



**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра вагонів**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни**

***«ЕКОЛОГІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВАГОННОМУ  
ГОСПОДАРСТВІ»***

**Харків 2021**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри вагонів 23 березня 2020 р., протокол № 8.

Методичні вказівки рекомендуються для студентів денної форми навчання.

Укладачі:

старш. викл. В. А. Гребенюк,  
асистенти В. В. Репко,  
І. В. Ялова

Рецензент

доц. В. Г. Равлюк

## ЗМІСТ

Вступ	4
1 Захист атмосферного повітря	6
2 Класифікація методів та апаратів для очищення аерозолів	9
3 Основні характеристики апаратів для очищення аерозолів	12
4 Загальна характеристика та принцип дії циклонів	14
5 Вибір та розрахунок циклонів	20
5.1 Розрахунок циклонів	20
5.2 Розрахунок конструкційних розмірів циклона	26
6 Завдання на розрахунково-графічну роботу	30
Список літератури	34

## ВСТУП

Розрахунково-графічну роботу призначено для студентів першого (бакалаврського) рівня спеціальності 273 «Залізничний транспорт» освітньої програми «Вагони та вагонне господарство» денної форми навчання з дисципліни «Екологічні технології у вагонному господарстві».

Розрахунково-графічна робота – один з видів самостійної роботи студентів і спрямована на закріплення і конкретизацію теоретичних знань з дисципліни, що вивчається. У процесі виконання роботи студенти мають засвоїти основні закономірності взаємодії людини, суспільства і природи; набути досвіду застосування своїх знань для розв'язання інженерних питань, що пов'язані з технічними розрахунками для вибору оптимальних параметрів обладнання, яке використовується на підприємствах залізничної галузі з метою захисту здоров'я працівників, запобігання забрудненню території та навколишнього природного середовища; розвинути навички користування спеціальною літературою.

Розрахунково-графічна робота складається з розрахунково-пояснювальної записки і графічної частини.

Розрахунково-пояснювальна записка роботи має містити 20-25 аркушів і складатися з таких основних розділів:

1 Вихідні дані (за варіантом у розділі 6).

2 Вступ, у якому необхідно зазначити: вплив забруднень повітря на здоров'я людини, якість продукції, прискорене спрацювання устаткування; важливе значення методів та обладнання очищення вентиляційних викидів промислових підприємств від шкідливих речовин.

3 Розрахунок та вибір типу циклона для очищення вентиляційних викидів від шкідливих речовин.

4 Опис і техніко-експлуатаційні характеристики підбраного циклона.

5 Розрахунок конструкційних розмірів підбраного циклона.

6 Висновок про забезпечення необхідного ступеня очищення газу від пилу підбраним циклоном, із зазначенням його типу і марки.

7 Список використаних джерел. У списку обов'язково вказуються літературні та електронні джерела.

За потреби текст розрахунково-пояснювальної записки може супроводжуватися рисунками і схемами.

Графічна частина розрахунково-графічної роботи складається з одного аркуша креслення формату А3: загальний вигляд підібраного циклона у двох проєкціях.

Усі креслення, рисунки і схеми, текстова частина розрахунково-пояснювальної записки виконуються з дотриманням вимог ЄСКД та Студентської навчальної звітності. Всі величини, прийняті у розрахунках, мають бути з посиланнями на джерело, з якого вони взяті. Особливу увагу необхідно звернути на застосування у розрахунках **єдиної системи одиниць**, щоб виключити помилки.

# 1 ЗАХИСТ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

На сучасному етапі для більшості промислових підприємств очищення вентиляційних викидів від шкідливих речовин є одним з основних заходів щодо захисту повітряного басейну. Завдяки очищенню викидів перед їх надходженням в атмосферу забезпечується запобігання забрудненню атмосферного повітря.

Очищення повітря має найважливіше санітарно-гігієнічне, екологічне та економічне значення [3, 8].

Етап пилоочищення посідає проміжне місце у комплексі «охорона праці – охорона навколишнього середовища». Пилоловлення при правильній організації розв'язує проблему забезпечення нормативів граничнодопустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони.

Надходження викидів шкідливих речовин у повітряне середовище виробничих приміщень і в атмосферу – результат недосконалості технологічного та транспортного обладнання, у першу чергу його негерметичності, а також відсутності або недостатньої ефективності пиловловлювальних і локалізаційних пристроїв і аспіраційних систем.

Забруднення повітря спричиняє значні економічні втрати. Запиленість і загазованість повітря у виробничих приміщеннях призводить до зниження продуктивності праці, втрати робочого часу через збільшення захворюваності. У багатьох виробництвах наявність пилу в повітряному середовищі погіршує якість продукції, прискорює спрацювання устаткування.

Дисперсний склад пилів обумовлює їхню проникну здатність в організм людини. Особливу небезпеку становлять токсичні тонкодисперсні пили з розміром частинок 0,5-10 мкм, які легко проникають в органи дихання.

Тверді компоненти аерозолів особливо небезпечні і викликають у людей специфічні захворювання.

Найбільш сильний вплив забруднень атмосферного повітря на здоров'я людини проявляється в період смогів [9].

Інтенсивний смог викликає задуху, приступи астми, алергійні реакції, подразнення очей, пошкодження рослинності, будівель і споруд (особливо сильно страждають покриття

будівель і скульптурні елементи). Накопичення шару пилу на листі рослин погіршує процеси фотосинтезу.

Наявність пилу в атмосфері, крім вищевказаних негативних наслідків, зменшує надходження до поверхні Землі ультрафіолетових променів; крім того, частинки пилу відбивають сонячне випромінювання і утруднюють відведення тепла від Землі, чим викликається парниковий ефект.

Одним із джерел забруднення атмосфери на залізниці є вагонні депо [10]. При технологічних процесах ремонту вагонів і їх вузлів на різних дільницях та відділеннях депо в повітря виділяється досить велика кількість забруднювальних речовин.

Основу більшості виробничих процесів обробки матеріалів у механічних відділеннях вагонних депо становлять процеси різання (гостріння, фрезерування, свердління, стругання), що пов'язано з утворенням поряд із стружкою досить дрібних пилових частинок, абразивної обробки (обдирання, заточення, шліфування, полірування), а також низка інших, пов'язаних з виготовленням виробів з неметалевих матеріалів [11].

При механічній обробці матеріалів джерелами утворення та виділення шкідливих речовин в атмосферу є різні металорізальні та абразивні верстати, що працюють з охолодженням і без нього, окремі типи допоміжного устаткування. При роботі цього обладнання в повітря виділяються шкідливі речовини у вигляді пилу, аерозолів і туманів мастил та інших охолоджувальних рідин, різних газоподібних компонентів.

При обробці на заточувальних і шліфувальних верстатах поряд з пилом металевим, що має склад оброблюваного матеріалу (або оксидів оброблюваного матеріалу), виділяється також пил абразивний, за складом аналогічний до матеріалу заточувального або шліфувального круга.

У зварювальних відділеннях під час оброблення металу виділяється багато пилу, туману кислот і мастил, токсичні гази [11]. При зварюванні утворюється дрібнодисперсний пил, що до 99 % складається із субмікронних частинок. Також атмосферне повітря забруднюється зварювальним аерозолем, у складі якого залежно від виду зварювання, марок електродів і флюсу містяться шкідливі для здоров'я оксиди металів (заліза, марганцю, хрому, ванадію, вольфраму, алюмінію, титану, цинку, міді, нікелю

та ін.), газоподібні (фтористі сполуки, оксиди вуглецю, азоту, озон).

Вентиляційне повітря з відділень, що обладнані нагрівальними печами, містить пари мастила, аміаку, ціаністого водню та інших шкідливих речовин. Із дробострумних камер після очищення металу від окалини з газом, що відходить, викидається до  $10 \text{ г/м}^3$  твердих частинок.

Лакофарбові дільниці при нанесенні фарби, ґрунтовок, розчинників на поверхні виробів значно забруднюють навколишнє середовище [11]. У цьому випадку в атмосферу з повітрям, що викидається, надходять пари розчинників, фарб,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , пари бензину, толуолу, ксилолу, пил та ін.

У зв'язку з цим є необхідність контролювати вміст шкідливих домішок в атмосфері. Для цього необхідне очищення виробничих газів перед викидом їх в атмосферу.



## 2 КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ТА АПАРАТІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ АЕРОЗОЛІВ

Під очищенням повітряно-газових викидів розуміють відділення від газу аерозольних домішок або надання забруднювальним домішкам нешкідливого стану.

Процес знепилювання повітря в загальному вигляді містить такі основні етапи [8]:

– запобігання розповсюдженню «вихідної» аеродисперсної системи в повітрі робочої зони та збільшення стійкості цієї системи в напрямку строго обмеженої заздалегідь виділеної області (процес пиловловлення);

– руйнування пилового аерозолу, що полягає у відділенні пилу з повітря (процес пилоочищення);

– подальше зниження стійкості пилового аерозолу, який зберігся після реалізації попередніх етапів, що полягає в інтенсифікації розповсюдження в повітрі пилових частинок, що залишилися, і аерації дисперсного середовища в приземному шарі атмосфери (процес розсіювання пилу).

Основним елементом систем пилоочищення є апарат очищення повітря від пилу [10].

Серед вихідних даних для вибору способів, технічних засобів і параметрів пиловловлення найбільш важливим є технологічні та пилоаеродинамічні.

Вибір обладнання при формуванні системи пиловловлення залежить від конкретних вимог виробництва.

Усе обладнання для санітарного очищення газів і повітря від зважених дисперсних частинок підрозділяється на дві категорії: апарати сухого очищення та апарати мокрого очищення.

У свою чергу апарати, які використовують сухі методи очищення, за сутністю фізичних явищ, що відбуваються в них, підрозділяються на гравітаційні, інерційні, фільтраційні та електричні [4].

*Гравітаційне осадження.* Частинки аерозолів осаджуються з потоку забрудненого повітря під дією сили ваги. Для цього створюється відповідний режим руху забрудненого повітря в апараті з урахуванням розміру частинок, їх щільності і т. д. Під

дією виникаючих відцентрових сил аерозольні частинки відкидаються на периферію апарата та осаджуються.

*Інерційне осадження.* Інерційне осадження ґрунтується на тому, що частинки аерозолів та зважене середовище через значну різницю щільностей мають різну інерцію. Аерозольні частинки, рухаючись за інерцією, відділяються від газового середовища.

До основних представників інерційних сухих пиловловлювачів відносять жалюзійні пристрої, циклони одиночні та групові, мультициклони.

*Фільтраційне осадження.* Частки аерозолів, зважені в повітряному (газовому) середовищі, затримуються у вузьких звивистих каналах і порах при проходженні повітряно-газового потоку через фільтрувальні матеріали.

*Осадження в електричному полі.* Електричне очищення газів побудовано на іонізації молекул газу електричним розрядом і електризації зважених у газі частинок. Проходячи електричне поле, частинки аерозолів отримують заряд. Рухаючись до електродів протилежного знака, вони осаджуються на них.

*Мокре очищення.* При використанні мокрих методів очищення газових викидів здійснюється шляхом тісної взаємодії між рідиною та запиленним газом на поверхні газових бульбашок, крапель або рідкої плівки. Змочування поверхні елементів апаратів водою або іншою рідиною сприяє затримці аерозольних частинок на такій поверхні.

Мокрі способи очищення твердих і рідких аерозолів мають суттєвий недолік – необхідність відділення вловленого забруднювача від уловлювальної рідини. З цієї причини мокрі способи слід застосовувати тільки за відсутності інших методів очищення, віддаючи перевагу способам з мінімальною витратою рідини.

До основних представників мокрих пиловловлювачів відносять промивачі порожнисті та насадкові, пінні, ударно-інерційної дії (струминні, імпакторні, ротоклони), скрубери Вентурі.

Пиловловлювальне обладнання зважаючи на все його різноманіття може бути класифіковане за низкою ознак: за призначенням; за основним способом дії; за ефективністю; за конструктивними особливостями.

Часто, залежно від коефіцієнта очищення, апарати поділяють на дві групи: грубого очищення і тонкого знепилювання. Однак поняття грубого очищення і тонкого знепилювання є відносними залежно від виду виробництва та завдань знепилювання.

При обробці викидів, що містять тверді аерозольні забруднювачі, низьких величин проскакування (1-2 % і менше) можна досягти, як правило, тільки двоступінчастим очищенням. Для попереднього очищення можуть бути застосовані жалюзійні ґрати та циклонні апарати (іноді для невеликих викидів – пилоосаджувальні камери), а для остаточної – пористі фільтри, електрофільтри або мокрі пилоосаджувачі.

У цілому система очищення повітря та газів може містити обладнання кількох типів, з'єднане в послідовний ланцюжок у міру підвищення ефективності пиловловлення. Пиловловлювальне обладнання, у якому відділення пилу від повітряного потоку здійснюється послідовно кількома ступенями, що відрізняються за принципом дії, конструктивними особливостям і способом очищення, відносять до комбінованого пиловловлювального обладнання.

### 3 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АПАРАТІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ АЕРОЗОЛІВ

До основних характеристик обладнання для очищення аерозолів від зважених частинок належать: ефективність (ступінь) очищення повітря від пилу (її також іноді називають коефіцієнтом корисної дії апарата); гідравлічний опір; вартість очищення; продуктивність щодо газу, що очищається, і енергоємність, обумовлена величиною витрат енергії на очищення 1000 м<sup>3</sup> газу [6, 8].

*Ефективність очищення* – найважливіша характеристика апарата. На неї орієнтуються при виборі пиловловлювального обладнання відповідно до допустимого залишкового вмісту пилу в повітрі, що очищається.

При оцінюванні ефективності роботи пиловловлювачів беруть до уваги:

- загальну ефективність знепилювання – кількість пилу, затриманого в пиловловлювачі, щодо кількості пилу, що міститься в знепилювальному газі;

- фракційну ефективність, що визначає повноту вловлювання частинок певних розмірів; її виражають відсотком відділених у пиловловлювачі частинок пилу певних розмірів;

- залишковий вміст пилу в газі при виході його з пиловловлювача;

- розподіл залишку пилу в газі за розміром частинок або швидкістю витання.

Для повної характеристики апарата потрібно знати його фракційну ефективність. Вона показує частку вловленого пилу за кожною фракцією. Це дає змогу вибрати пиловловлювальне обладнання відповідно до фракційного складу пилу.

*Продуктивність* характеризується кількістю повітря, яка очищається за 1 годину. Апарати, у яких повітря очищається при проходженні через фільтрувальний шар, характеризуються питомим повітряним навантаженням, тобто кількістю повітря, що проходить через 1 м<sup>2</sup> фільтрувальної поверхні за 1 годину.

*Гідравлічний опір* має важливе значення, тому що від його величини залежить необхідний тиск вентилятора, а отже, і витрата електроенергії.

*Витрата енергії* залежить значною мірою від гідравлічного опору апарата. Питомі витрати енергії на видалення дисперсних домішок зростають пропорційно зниженню концентрації зважених у потоці частинок, оскільки ступінь очищення в пиловловлювальних апаратах практично не залежить від початкової концентрації забруднювача. На додаток до цього витрати зростають і зі зменшенням розмірів частинок.

*Вартість очищення* є найважливішим показником, тому що характеризує економічність очищення. Вона залежить від багатьох факторів: капітальних витрат на обладнання, експлуатаційних витрат та ін.

Вартість очищення повітря в різних апаратах значно відрізняється. Як правило, більш ефективне очищення обходиться значно дорожче.

## 4 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ПРИНЦИП ДІЇ ЦИКЛОНІВ

Завдяки дешевизні та простоті будови і обслуговування, порівняно невеликому опору і високій продуктивності широкого застосування для сухого очищення газів від пилу набули циклони різних типів [8, 10].

Циклони призначені для сухого очищення газів від пилу із середнім розміром частинок 10–20 мкм. Надлишковий тиск газів, що надходять у циклон, не має перевищувати 2500 Па. Температура газів, щоб уникнути конденсації парів рідини, вибирається на 30–50 °С вище за температуру точки роси, а за умовами міцності конструкції – не вище 400 °С. Продуктивність циклона залежить від його діаметра, збільшуючись із зростанням останнього.

Циклони складаються з корпусу, вхідного патрубку, вихлопної труби і бункера (рисунок 4.1).

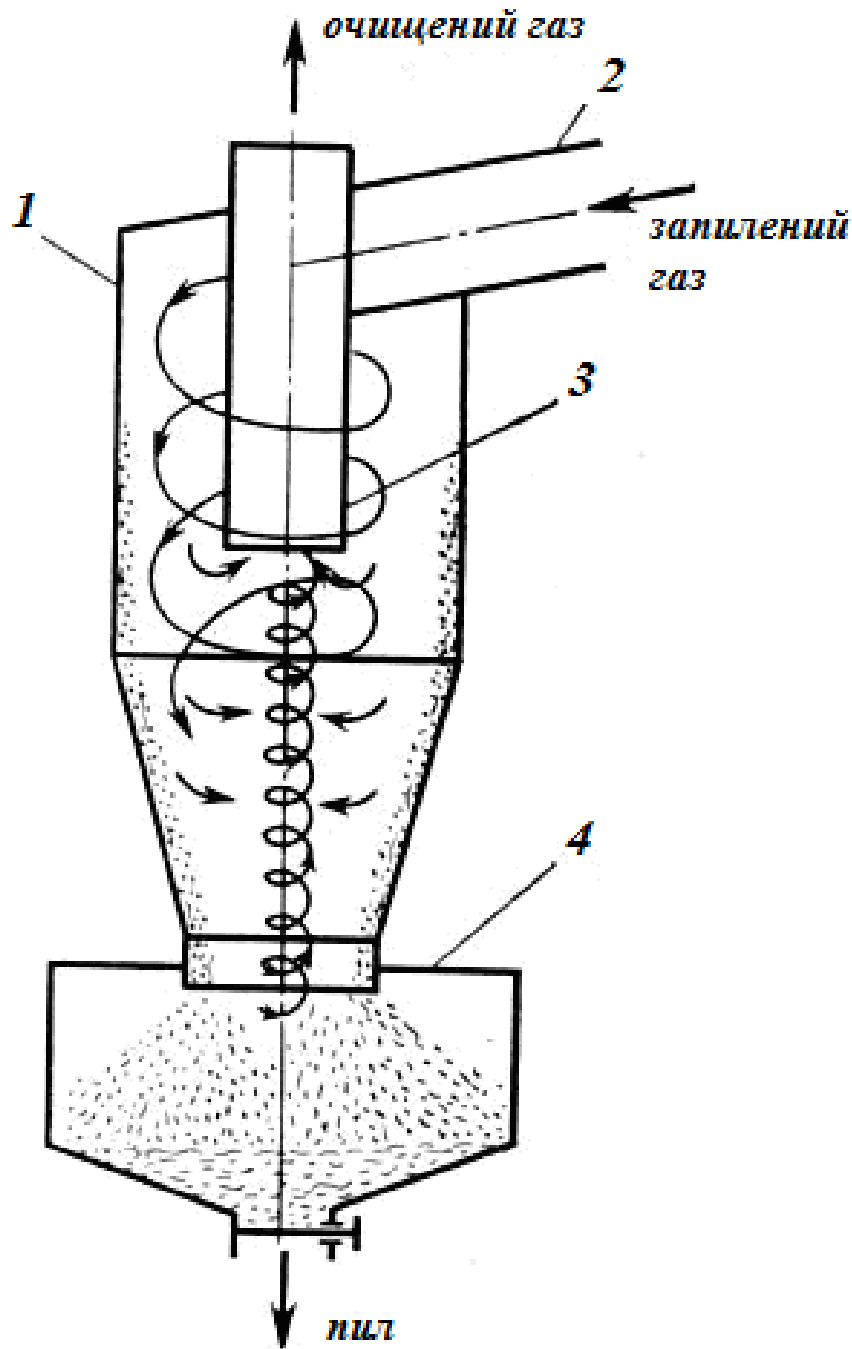
Газовий потік уводиться в циклон через вхідний патрубок по дотичній до внутрішньої поверхні корпусу та здійснює обертально-поступальний рух уздовж корпусу до бункера (рисунок 4.1). На частинку пилу діють: сила тяжіння, сила опору середовища, відцентрова сила.

Під дією відцентрової сили частинки пилу утворюють на стінці циклона пиловий шар, який разом із частиною газу через патрубок виходу пилу потрапляє в бункер для прийому пилу.

Ефективність циклона тим вища, чим більший діаметр частинок пилу, їхня питома вага, швидкість обертання газового потоку та чим менший діаметр циклону.

Відділення частинок пилу від газу, що потрапив у бункер, відбувається при повороті газового потоку в бункері на 180°. Звільнившись від пилу, газовий потік утворює вихор і виходить, даючи початок вихору газу, що залишає циклон через вихідну трубу. Для нормальної роботи циклона необхідна герметичність бункера. Якщо бункер негерметичний, то через підсмоктування зовнішнього повітря відбувається винос пилу з потоком через вихідну трубу.

Циклони не застосовуються для очищення вологих газів і вибухонебезпечних середовищ.



1 – корпус; 2 – вхідний патрубок;  
3 – вихлопна труба; 4 – бункер

Рисунок 4.1 – Основні елементи та схема роботи циклона

При виборі та розрахунках циклонів необхідно враховувати властивості пилу – абразивність і злипання. Для зменшення абразивного зношування слід вибирати циклони виходячи з найменших значень швидкості газу. При вловлюванні пилу, що

сильно злипається, не рекомендується застосовувати циклони малого діаметра (менше 0,8 м), які схильні до залипання. Так, для очищення газів від сажі застосовуються конічні циклони серії СК, які мають високу ефективність за рахунок більш високого гідравлічного опору.

Циклони мають такі переваги [8]:

- відсутність рухомих частин в апараті;
- надійність роботи при температурах газів майже до 500 °С без будь-яких конструктивних змін (для роботи при більш високих температурах циклони виготовляють зі спеціальних матеріалів);
- можливість уловлювання абразивних матеріалів при захисті внутрішніх поверхонь циклонів спеціальними покриттями;
- уловлювання пилу в сухому вигляді;
- майже постійний гідравлічний опір апарата;
- апарати успішно працюють при високому тиску газів;
- простота виготовлення пиловловлювачів;
- зростання запиленості газів не призводить до зниження фракційної ефективності очищення пилу.

Правильно запроектовані циклони можуть експлуатуватися надійно протягом багатьох років.

Разом з тим необхідно мати на увазі недоліки пиловловлювачів:

- високий гідравлічний опір досягає 1250–1500 Па;
- погане вловлювання частинок розміром менше 5 мкм;
- неможливість використання апаратів для очищення газів від липких забруднень.

У цей час застосовується близько двадцяти типів циклонів. Порівняльні випробування циклонів різного типу показали, що для промислового застосування вони можуть бути обмежені в більшості випадків циліндричними (серія ЦН) і конічними (серія СК) циклонами НДІОГАЗ (науково-дослідний інститут промислового та санітарного очищення газів) [8]. Найбільш часто застосовуються циліндричні циклони марок ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 (рисунок 4.2), конічні СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М (рисунок 4.3).



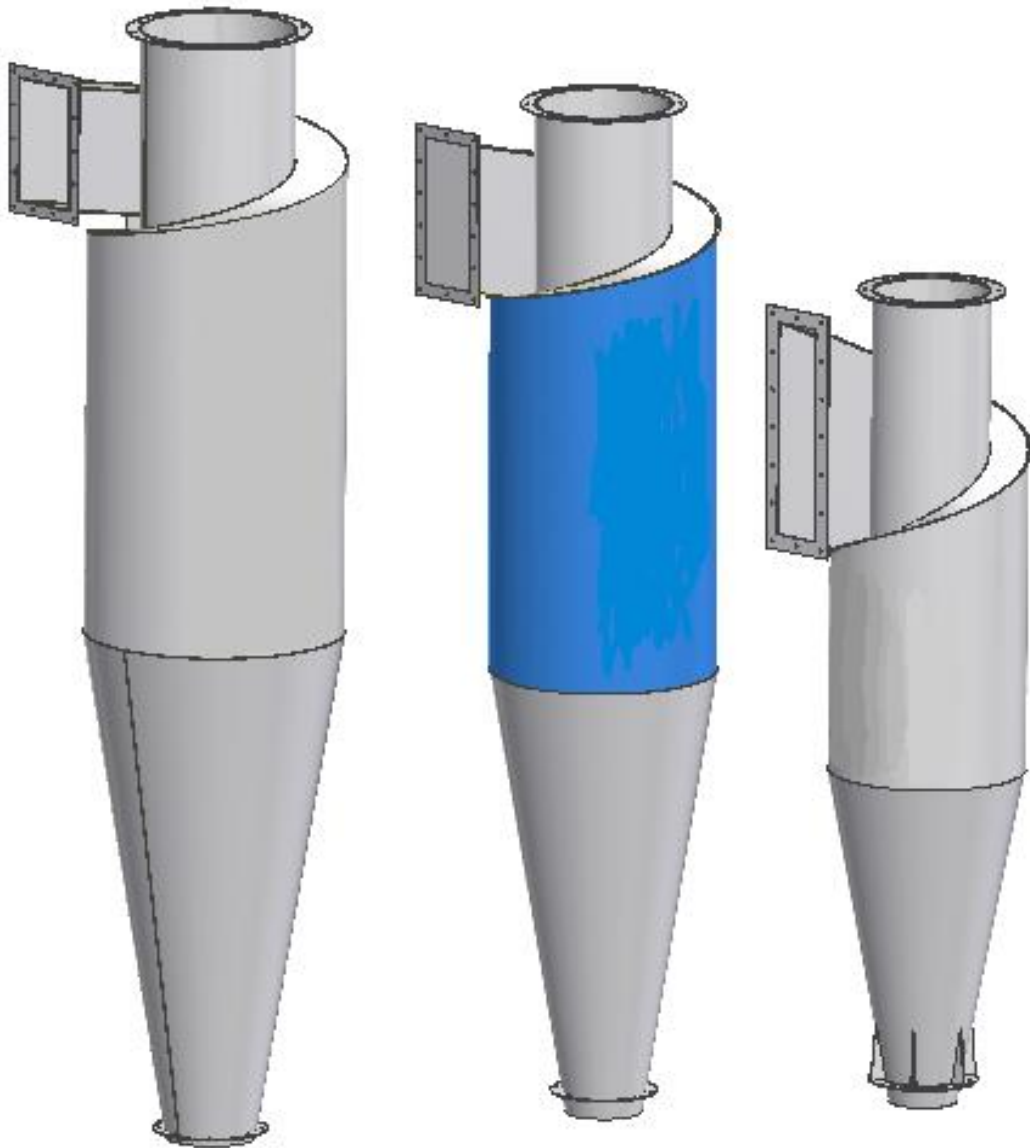


Рисунок 4.2 – Циліндричні циклони серії ЦН:  
ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24

Циклони НДІОГАЗ підрозділяються на високоефективні та високопродуктивні. Циклони СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, ЦН-11 належать до високоефективних циклонів. При діаметрах менше 1 м вони забезпечують ступінь очищення  $\eta=0,85-0,95$  при вловлюванні частинок діаметром більше 5 мкм. Циклони типу ЦН-24 належать до високопродуктивних, вони можуть надійно і без забивання працювати при високій вхідній запиленості. Циклони типу ЦН-15 займають середню позицію і забезпечують дещо менший ступінь очищення, ніж циклони ЦН-11, але мають більшу надійність при роботі в умовах підвищеної запиленості.

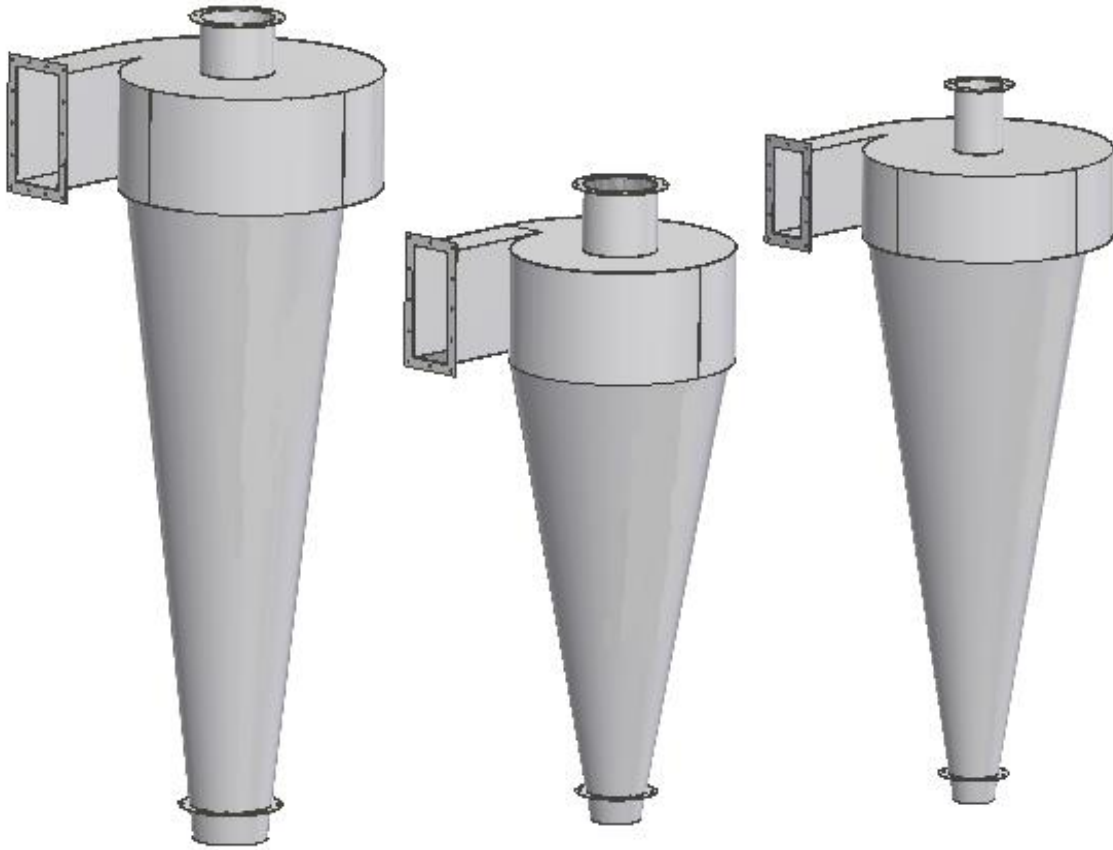


Рисунок 4.3 – Конічні циклони серії СК:  
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М

Циліндричні циклони серії ЦН призначені для вловлювання сухого пилу аспіраційних систем. Їх рекомендується використовувати для попереднього очищення газів при початковій запиленості до  $400 \text{ г/м}^3$  і встановлювати перед фільтрами і електрофільтрами.

Відмінною особливістю циліндричних циклонів серії ЦН (дивись рисунок 4.2) є наявність подовженої циліндричної частини, нахил кришки і вхідного патрубку  $\alpha$  відповідно  $11^\circ$ ,  $15^\circ$  і  $24^\circ$  та однакове (у всіх цих циклонів) співвідношення діаметра вихлопної труби  $d$  до діаметра циклона  $D$ :  $d/D=0,59$ . Допустима запиленість газів, що очищаються, залежить від діаметра циклона.

Конічні циклони серії СК призначені для очищення газів від сажі. Вони мають підвищену ефективність у порівнянні з циклонами типу ЦН через більший гідравлічний опір. Вхідна концентрація сажі не має перевищувати  $50 \text{ г/м}^3$ .

Конічні циклони серії СК (дивись рисунок 4.3) відрізняються подовженою конічною частиною, спіральним вхідним патрубком у вигляді завитки і малим відношенням діаметрів вихлопної труби  $d$  до діаметра циклонів  $D$ :  $d/D=0,33$  і  $0,34$  відповідно.

Вибір типу і розміру циклона проводиться на підставі заданої витрати газів, фізико-хімічних властивостей пилу, необхідного ступеня очищення, габаритів установки, експлуатаційної надійності і вартості очищення.

Розрахунок циклонів ведуть методом узагальнення і використання показників, що одержують при випробуваннях циклонів у промислових умовах.

## 5 ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК ЦИКЛОНІВ

### 5.1 Розрахунок циклонів

Розрахунок циклонів ведуть методом послідовних наближень [8, 11].

Щоб розрахувати циклон, необхідно мати такі вихідні дані:

- обсяг газу, що очищається,  $Q$ , м<sup>3</sup>/с;
- щільність газу при робочих умовах  $\rho_g$ , кг/м<sup>3</sup>;
- в'язкість газу при робочій температурі  $\mu$ , Па·с;
- дисперсний склад пилу  $d_p$ , мкм;
- вхідна концентрація пилу  $C_{вх}$ , г/м<sup>3</sup>;
- дисперсність частинок пилу  $lg\sigma_p$ ;
- щільність частинок  $\rho_{ч}$ , кг/м<sup>3</sup>;
- необхідна ефективність очищення  $\eta$ .

Прийнято такий ряд внутрішнього типового діаметра циклонів  $D$ , мм: 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; 2400; 3000.

Розрахунок циклона проводять за таким порядком.

Задаються типом циклона і визначають оптимальну швидкість руху газу  $w_{опт}$  залежно від типу циклона (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Оптимальна швидкість руху газу  $w_{опт}$  залежно від типу циклона

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
$w_{опт}$ , м/с	4,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

Розраховують діаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot N \cdot w_{опт}}}, \quad (5.1)$$

де  $Q$  – обсяг газу, що очищається, м<sup>3</sup>/с;

$w_{опт}$  – оптимальна швидкість руху газу в циклоні, м/с;

$N$  – кількість циклонів.

Отримане значення діаметра  $D$  округляють до найближчого типового значення внутрішнього діаметра циклона  $D_{ц}$ . Якщо значення  $D$  перевищує максимальне типове значення, то необхідно застосовувати два або більше паралельно встановлених циклонів.

Відповідно до обраного діаметра циклона знаходимо дійсну швидкість потоку газу в циклоні:

$$w = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot N \cdot D^2}. \quad (5.2)$$

При цьому потрібно, щоб дійсна швидкість у циклоні не відхилялася від оптимальної більш ніж на 15 %:

$$100 \cdot \left| \frac{w - w_{\text{опт}}}{w_{\text{опт}}} \right| \leq 15\%.$$

При відхиленні більш ніж 15 % вибирають інший тип циклона і повторюють розрахунок.

Розраховуємо значення гідравлічного опору:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}} = \frac{1}{2} \cdot R \cdot \rho_{\text{г}} \cdot w^2, \quad (5.3)$$

де  $R$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$\rho_{\text{г}}$  – щільність газу при робочих умовах, кг/м<sup>3</sup>.

Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного опору:

$$R = k_1 \cdot k_2 \cdot R_{500} + k_3, \quad (5.4)$$

де  $k_1$  і  $k_2$  – поправкові коефіцієнти, що залежать від  $D$ ,  $C_{\text{вх}}$  та типу циклона (таблиці 5.2, 5.3);

$R_{500}$  – коефіцієнт гідравлічного опору циклона при  $D=500$  мм (таблиця 5.4);

$k_3$  – поправковий коефіцієнт групової ув'язки циклонів (враховує додаткові втрати тиску, пов'язані з компонованням

циклонів), для одиночних циклонів  $k_3=0$ , при прямокутному компонуванні  $k_3=35$ , при круговому компонуванні  $k_3=60$ .

Таблиця 5.2 – Значення  $k_1$  при різних  $D$  та типах циклонів

Тип циклона	$D$ , мм				
	150	200	300	400	>500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-24	0,85	0,9	0,93	1,0	1,0
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 і 34М	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблиця 5.3 – Значення  $k_2$  при різних  $C_{\text{вх}}$  і типах циклонів

Тип циклона	$C_{\text{вх}}$ , г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	–
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	–	–	–

Таблиця 5.4 – Значення  $R_{500}$  залежно від типів циклонів

Тип циклона	Вихлоп		Тип циклона	Вихлоп	
	в атмо-сферу	гідр. мережу		в атмо-сферу	гідр. мережу
ЦН-11	245	250	СДК-ЦН-33	520	600
ЦН-15	155	163	СК-ЦН-34	1050	1150
ЦН-24	75	80	СК-ЦН-34М	–	2000

При виборі значень параметра  $R_{500}$  для непарних варіантів завдання прийняти умови – «при вихлопі в атмосферу», для парних варіантів завдання – «при вихлопі в гідравлічну мережу».

Для кожного типу циклона відношення його опору  $\Delta P$  до щільності газу  $\rho_{\Gamma}$  за робочих умов повинно мати певне оптимальне значення.

Для циклонів типу:

ЦН-11	$\Delta P/\rho_{\Gamma} = 800-1400 \text{ м}^2/\text{с}^2;$
ЦН-15	$\Delta P/\rho_{\Gamma} = 500-1000 \text{ м}^2/\text{с}^2;$
ЦН-24	$\Delta P/\rho_{\Gamma} = 300-600 \text{ м}^2/\text{с}^2;$
СДК-ЦН-33	$\Delta P/\rho_{\Gamma} = 1200-2400 \text{ м}^2/\text{с}^2;$
СК-ЦН-34-34М	$\Delta P/\rho_{\Gamma} = 1200-2400 \text{ м}^2/\text{с}^2.$

Якщо цих співвідношень дотримано, то циклон обраний правильно, якщо ні – необхідно вибрати наступний циклон і повторити розрахунок.

Далі визначають ступінь ефективності очищення газу в циклоні:

$$\eta = 0,5 \cdot (1 + \Phi(x)), \quad (5.5)$$

де  $\Phi(x)$  – повний коефіцієнт очищення газу, виражений у частках.

Значення нормальної функції розподілу  $\Phi(x)$  визначають за величиною параметра  $x$ .

Розрахунок параметра  $x$  здійснюють за формулою:

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_{50}}{d_{T50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\text{Тп}} + \lg^2 \sigma_{\text{ч}}}}, \quad (5.6)$$

де  $d_{50}$  і  $d_{T50}$  – діаметри частинок, реально осаджених з ефективністю 50 % за робочих умов і умов роботи типового циклона відповідно;

$\lg \sigma_{\text{Тп}}$  – дисперсність пилу при роботі типового циклона (приймається за таблицею 5.5);

$\lg \sigma_{\text{ч}}$  – задана дисперсність пилу.

Визначаємо параметр  $d_{50}$  – діаметр частинок, реально осаджених з ефективністю 50 % за робочих умов:

$$d_{50} = d_{T50} \cdot \sqrt{\frac{D}{D_T} \cdot \frac{\rho_{чТ}}{\rho_ч} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{w_T}{w}}, \quad (5.7)$$

де  $\rho_ч$  – щільність частинки, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – в'язкість середовища, Па·с;  
 $w$  – швидкість потоку, м/с;  
 $D_T=600$  мм;  
 $\rho_{чТ}=1930$  кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu_T=22,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с;  
 $w_T=3,5$  м/с.

Індекс «Т» відповідає умовам роботи типового циклона.

Значення параметрів пилу  $d_{T50}$  для кожного типу циклона подано в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Значення  $d_{T50}$  і  $lg\sigma_{Тп}$  залежно від типів циклонів

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
$d_{T50}$	8,5	4,5	3,65	2,31	1,95	1,13
$lg\sigma_{Тп}$	0,308	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

Отримане значення  $d_{50}$  має бути менше  $d_{п}$  (заданого дисперсного складу пилу), мкм. Якщо ця умова не виконується, необхідно вибрати інший циклон з меншим значенням  $d_{T50}$  і повторити розрахунок.

Залежно від однієї з дотримуваних умов,  $\Phi(x)$  обчислюють за однією з формул:

- якщо  $0 \leq x \leq 0,6$ , то значення нормальної функції розподілу  $\Phi(x)$  визначають за формулою:

$$\Phi(x) = 0,3762 \cdot x + 0,5; \quad (5.8)$$



- якщо  $x > 0,6$ , то значення нормальної функції розподілу  $\Phi(x)$  визначають за формулою:

$$\Phi(x) = 1 - \frac{1}{5,8x + 0,5}. \quad (5.9)$$

Розрахункове значення ступеня ефективності очищення газу  $\eta$  у циклоні неодмінно має дорівнювати або бути більшим за необхідне за умовами розв'язуваної задачі. Лише в такому разі можна стверджувати, що циклон підібраний правильно.

Якщо розрахункове  $\eta$  менше за потрібне, то необхідно вибрати інший циклон з більшим коефіцієнтом гідравлічного опору  $R$ .

Для орієнтовних розрахунків необхідного (потрібного) значення  $R_{\Pi}$  рекомендується така залежність:

$$R_T = R_P \cdot \left( \frac{1 - \eta_P}{1 - \eta_T} \right)^2 \cdot \frac{w_P}{w_T} \cdot \frac{D_T}{D_P}, \quad (5.10)$$

де індекси  $\Pi$  і  $P$  відповідають двом різним циклонам: потрібному і розрахунковому.

Збільшення діаметра циклона призводить до зниження його ефективності, внаслідок чого циклони типу ЦН діаметром понад 1000 мм застосовувати не рекомендується.

У разі недосягнення необхідного значення очищення, слід використовувати попереднє очищення газу перед подачею в циклон або доочищення. Для цього на вході або виході циклона можуть бути встановлені фільтри.

Розрахунок потужності привода подачі газу. Величина гідравлічного опору і об'ємна витрата  $Q$  газу, що очищається, визначають потужність  $N$  привода пристрою, Вт, для подачі газу в циклон:

$$N = \frac{K_3 \cdot \Delta P \cdot Q}{\eta_M \cdot \eta_B}, \quad (5.11)$$

де  $\Delta P$  – гідравлічний опір циклона, Па;

$Q$  – обсяг газу, що очищається,  $Q$ , м<sup>3</sup>/с;

$K_3$  – коефіцієнт запасу потужності,  $K_3 = 1,2$ ;

$\eta_M$  – ККД передачі потужності від електродвигуна до вентилятора,  $\eta_M = 0,8$ .

$\eta_B$  – ККД вентилятора,  $\eta_B = 0,8$ .

Визначення концентрації пилу на виході з циклона:

$$C_{\text{ВЫХ}} = C_{\text{ВХ}} (1 - \eta), \frac{\text{г}}{\text{м}^3}. \quad (5.12)$$

## 5.2 Розрахунок конструкційних розмірів циклона

Геометричні розміри циліндричних і конічних циклонів вказуються в частках від внутрішнього діаметра [8, 11].

Розраховують конструкційні розміри циклона відповідно до діаметра  $D$  обраного циклона:

$$x = k \cdot D, \quad (5.13)$$

де  $x$  – параметр циклона (діаметр, ширина, висота та ін.);

$k$  – коефіцієнт пропорційності.

Значення коефіцієнта пропорційності  $k$  приймається за таблицею 5.6 залежно від типу підбраного циклона.

Таблиця 5.6 – Значення коефіцієнта пропорційності  $k$

Параметр	Тип циклона					
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
1	2	3	4	5	6	7
Кут нахилу кришки і вхідного патрубку $\alpha$	11°	15°	24°	-	-	-
Внутрішній діаметр вихлопної труби $d$	0,59			0,334	0,34	0,22

Продовження таблиці 5.6

1	2	3	4	5	6	7
Внутрішній діаметр пиловипускного отвору $d_1$	0,3–0,4			0,334	0,23	0,18
Ширина (внутрішній розмір) вхідного патрубку $b$	0,2			0,264	0,214	0,18
Ширина (внутрішній розмір) вхідного патрубку на вході $b_1$	0,26			-	-	-
Довжина вхідного патрубку $l$	0,6					
Висота вхідного патрубку $a$	0,48	0,66	1,11	0,535	0,515	0,4
Висота вихлопної труби $h_T$	1,56	1,74	2,11	-	-	-
Висота заглиблення вихлопної труби $h_{зТ}$	-	-	-	0,535	0,515	0,4
Висота зовнішньої частини вихлопної труби (ВТ) $h_{зов}$	0,3	0,3	0,4	0,2–0,3		
Висота циліндричної частини $H_{ц}$	2,06	2,26	2,11	0,535	0,515	0,4
Висота конічної частини $H_{к}$	2,0	2,0	1,75	3,0	2,11	2,6
Висота установлення фланця $h_{фл}$	0,1					
Загальна висота циклона $H$	4,38	4,56	4,26	3,835	2,925	3,3

Для конічних циклонів розраховується радіус завитки  $\rho$  за формулами:

для циклона СДК-ЦН-33:

$$\rho = \frac{D}{2} + \frac{b \cdot \varphi}{2 \cdot \pi}, \quad (5.14)$$

для циклонів СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М:

$$\rho = \frac{D}{2} + \frac{b \cdot \varphi}{\pi}, \quad (5.15)$$

де  $b$  – ширина вхідного патрубку;

$\varphi$  – кут радіуса завитки  $\rho$ ,  $\varphi = 135^\circ = 2,355$  рад.

Основними елементами циклона є:

- вхідний патрубок,
- корпус, який складається з циліндричної частини та конічної частини,
- пиловипускний отвір,
- вихлопна труба,
- похила кришка,
- бункер,
- пиловий затвор.

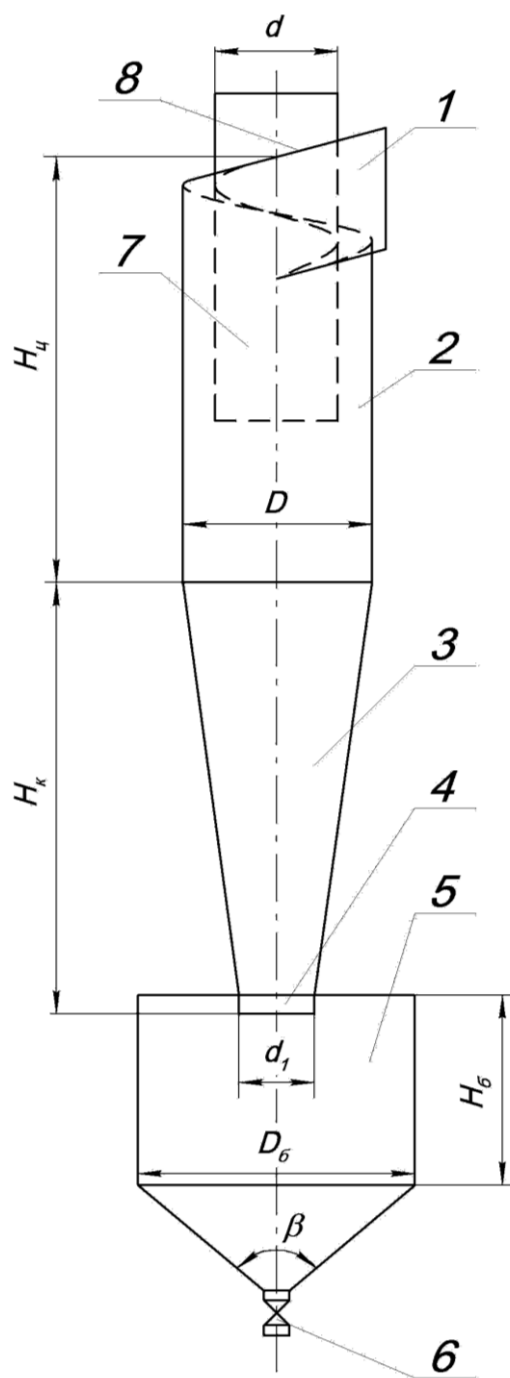
Для всіх одиночних циклонів бункери виконуються циліндричної форми.

Діаметр бункера  $D_6$ , дорівнює  $1,5 D$  для циліндричних і  $1,1-1,2 D$  для конічних циклонів. Висота циліндричної частини бункера  $H_6$  становить  $0,8 D$ .

Днище бункера виконується з кутом  $\beta = 60^\circ$  між стінками. Отвори для вивантаження пилю прийняті залежно від ємності бункерів і продуктивності циклонів, мають діаметри 200, 300 або 500 мм.

Конуси циклонів опускаються в бункер на глибину, що дорівнює  $0,8$  діаметра отвору в них.

Схему циклона з бункером наведено на рисунку 5.1.



- 1 – вхідний патрубок; 2 – циліндрична частина корпусу;  
 3 – конічна частина корпусу; 4 – пиловипускний отвір;  
 5 – бункер для пилу; 6 – пиловий затвор;  
 7 – вихлопна труба; 8 – похила кришка

Рисунок 5.1 – Схема циклона з бункером

## 6 ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНУ РОБОТУ

Розрахунково-графічну роботу складають дві задачі.

### Задача 1

Підібрати циклон, що забезпечує ступінь ефективності очищення газу від пилу не менше заданого  $\eta$  відповідно до варіанта завдання за таблицею 6.1.

Необхідно зробити висновки про забезпечення підібраним циклоном необхідного ступеня очищення газу від пилу.

Дані для розв'язання першої задачі вибираються за варіантом з таблиці 6.1.

### Задача 2

Розрахувати конструкційні розміри циклона відповідно до діаметра  $D$  обраного циклона. Накреслити циклон за конструкційними розмірами в масштабі, який треба обрати самостійно.

Схеми циліндричних та конічних циклонів наведено на рисунках 6.1, 6.2.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

Варіант	$\eta$	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$\rho_{\text{ч}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_{\text{вх}}$ , г/м <sup>3</sup>	$d_{\text{п}}$ , мкм	$\rho_{\text{г}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu \cdot 10^{-6}$ , Па·с	$\lg \sigma_{\text{ч}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,76	1,2	1930	10	20	1,29	22,2	0,501
2	0,78	1,5	1800	20	25	1,29	22,1	0,602
3	0,77	1,7	1870	40	15	1,29	22	0,535
4	0,85	1,0	1000	0	10	1,29	21,9	0,479
5	0,8	1,25	1950	20	23	1,29	21,8	0,697
6	0,79	1,5	1870	10	30	1,29	21,7	0,25
7	0,86	1,2	1300	0	40	1,29	21,6	0,25

## Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	0,81	1,6	1450	120	50	1,29	21,5	0,301
9	0,79	1,55	1560	150	35	1,29	21,4	0,334
10	0,77	1,5	1920	10	45	1,29	21,2	0,468
11	0,8	1,2	1200	20	15	1,29	21,1	0,345
12	0,81	1,2	1500	0	50	1,29	21	0,652
13	0,78	1,6	1870	40	20	1,29	22,9	0,352
14	0,79	1,65	1860	0	28	1,29	22,8	0,215
15	0,77	1,5	1750	150	44	1,29	22,7	0,506
16	0,77	1,35	1680	120	25	1,29	22,0	0,21
17	0,82	1,05	1950	0	43	1,29	21,7	0,36
18	0,75	1,2	1380	10	38	1,29	21,6	0,36
19	0,76	1,0	1830	40	55	1,29	21,2	0,352
20	0,78	1,5	1750	80	41	1,29	22,1	0,486
21	0,8	1,3	1930	120	16	1,29	21,5	0,214
22	0,76	1,2	1950	20	33	1,29	22,2	0,385
23	0,81	1,5	1880	150	47	1,29	22,1	0,486
24	0,86	1,25	1100	10	39	1,29	22,0	0,312
25	0,75	1,3	1750	20	45	1,29	21,9	0,268
26	0,65	1,1	1930	40	15	1,29	21,8	0,314
27	0,83	1,0	1800	40	50	1,29	21,7	0,468
28	0,78	1,6	1870	20	20	1,29	21,6	0,214
29	0,8	1,2	1000	80	28	1,29	21,5	0,385
30	0,77	1,5	1950	10	44	1,29	22,1	0,486

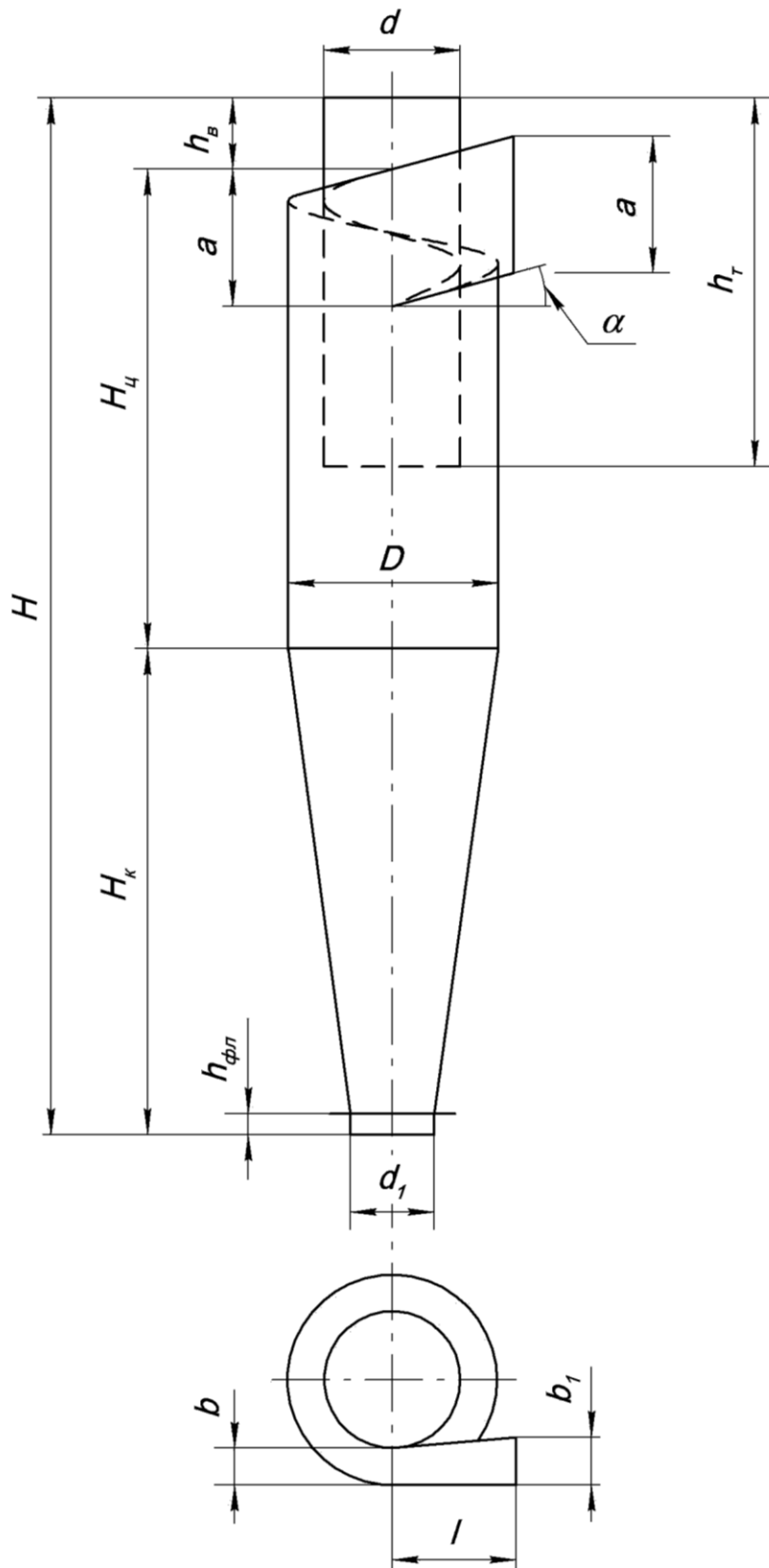


Рисунок 6.1 – Схеми циліндричних циклонів ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24



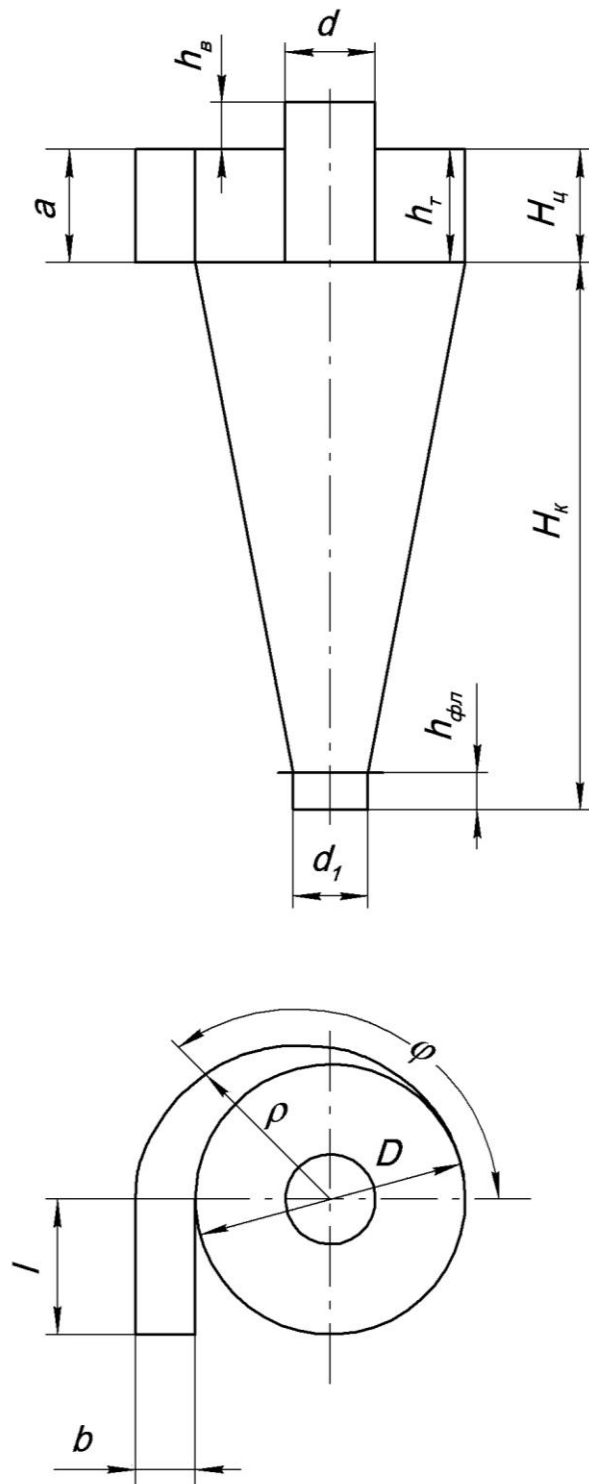


Рисунок 6.2 – Схеми конічних циклонів  
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М

## Список літератури

1 Інженерна екологія. Теорія і практика сталого розвитку: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В. А. Баженов, В. М. Ісаєнко, Ю. М. Саталікін та ін.; за заг. ред. В. П. Бабака. Київ: Книжкове вид-во НАУ, 2006. 492 с.

2 Білявський Г. О. Основи екології: навч. посіб. Київ: Либідь, 2006. 408 с.

3 Бойчук Ю. Д., Солошенко Е. М., Бугай О. В. Екологія і охорона навколишнього середовища: навч. посіб. Вид. 4-те, випр. і допов. Суми: Університетська книга, 2018. 315 с.

4 Джигирей В. С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища: навч. посіб. Вид. 5-те, випр. і допов. Київ: Знання, 2007. 422 с.

5 Основи екології та природокористування: навч. посіб. / В. Л. Дикань, А. Г. Дейнека, Л. О. Позднякова, І. Д. Михайлов, А. О. Каграманян Харків: ООО «Олант», 2002. 384 с.

6 Екологія: підручник / С. І. Дорогунцов, К. Ф. Коценко, М. А. Хвесик та ін. Київ: КНЕУ, 2006. 371 с.

7 Основи екології. Екологічна економіка та управління природокористуванням: підручник / за заг. ред. д. е. н., проф. Л. Г. Мельника та к. е. н., проф. М. К. Шапочки. Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. 759 с.

8 Природоохоронні технології. Ч.1. Захист атмосфери: навч. посіб. / Л. І. Северин, В. Г. Петрук, І. І. Безвозюк, І. В. Васильківський Вінниця: ВНТУ, 2012. 388 с.

9 Основи екології: навколишнє середовище і техногенний вплив: підручник / Я. П. Скоробогатий, В. В. Ощиповський, В. О. Василечко, С. Л. Кусковець. Львів: «Новий світ-2000», 2011. 222 с.

10 Гребенюк В. А., Репко В. В. Екологічні технології у вагонному господарстві: конспект лекцій Харків: УкрДУЗТ, 2018. 122 с.

11 Гребенюк В. А., Репко В. В. Екологічні технології у вагонному господарстві: методичні вказівки. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 50 с.

12 Тимофєєва Л. А., Путятіна Л. І. Основи екології: конспект лекцій. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Ч. 1. 46 с.

13 Тимофєєва Л. А., Путятіна Л. І. Основи екології: конспект лекцій. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Ч. 2. 66 с.

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни  
*«ЕКОЛОГІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВАГОННОМУ ГОСПОДАРСТВІ»*

Відповідальний за випуск Гребенюк В. А.

Редактор Буранова Н. В.

---

Підписано до друку 07.07.20 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк. арк. 1,5. Тираж 5. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет  
залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.