

УДК 621.928.93

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.180407

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ЦИКЛОННИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

Рижов В. І.

1. Вступ

Циклоні пиловловлювачі відносяться до найбільш поширених типів інерційного пиловловлюючого устаткування, завдяки порівняно високому ступеню очистки від фракцій пилу діаметром більш 10 мкм, простоті конструкції та високій продуктивності по газовому потоку. Існуючі методи розрахунку ефективності очищення від пилу в циклонах є не завжди достатньо точними. В основному, для цього використовуються методи експериментальних випробувань, пов'язаних із значними витратами часу та коштів [1]. Тому розробка найбільш точнішого та удосконаленого аналітичного методу розрахунку параметрів пофракційного ступеня очистки циклонних апаратів залишається і досі вкрай важливим та актуальним завданням [2].

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є метод розрахунку ефективності циклонів з використанням величини швидкості поперечних пульсацій турбулентного газового потоку у вхідному патрубку циклона. Складність існуючих методів розрахунку ефективності циклонів полягає в тому, що необхідно враховувати велику кількість факторів, що впливають на кінцевий результат. З таких факторів найвпливовішими є швидкість газу во вхідному патрубку циклону, діаметр циклона, діаметр вихлопного патрубка циклона, розподіл частинок пилу по розмірам, щільність газу, пилу та ін. Тобто задача є багатofакторною і тому досить важка для вирішення, а наявні методи розрахунку ефективності циклонів, в ряді випадків, є не досить неточними.

Одним з найбільш проблемних питань при створенні нової циклонічної техніки очищення газів від пилу є необхідність виконання досить великого обсягу робіт – моделювання циклонів в лабораторних умовах на модельних циклонах [3], облік масштабного переходу та ін. Тому розробка найбільш точнішого аналітичного методу розрахунку ефективності циклонів є важливою проблемою, оскільки з'явиться можливість швидко і точно визначити всі необхідні параметри циклону для конкретних умов виробництва [4, 5].

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є створення найбільш точнішого аналітичного методу розрахунку ефективності циклонів при різних конструктивних та технологічних параметрах.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Зробити аналіз впливу величини середньої по поперечному перерізу вхідного патрубка циклона швидкості поперечних пульсацій турбулентного

газового потоку у вхідному патрубку циклона на величину діаметра «відсікання» $\langle d_{\eta=50} \rangle$.

2. Зробити обґрунтування переваг запропонованого у роботі удосконаленого методу розрахунку загального ступеня золовловлювання в різних по конструктивному виконанню циклонах та різних параметрів пилу та газів.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Серед основних напрямків вирішення проблеми розробки аналітичних методів розрахунку ефективності циклонів, виявлених в ресурсах наукової періодики, можуть бути виділені [6, 7], але в них не розглянуто порівняння різних аналітичних методів розрахунку найважливішого для розрахунку ефективності циклонів діаметра $\langle d_{\eta=50} \rangle$.

А ось робота [4] присвячена розрахунку ефективності циклонів з використанням залежності величини діаметра $\langle d_{\eta=50} \rangle$ від величини коефіцієнту гідравлічного опору циклонів. Проте є невирішеним питання впливу на ефективність очищення пульсаційної динамічної швидкості потоку.

Автором роботи [5] показано вплив джгутів пилу та їх характеристик на ефективність очистки циклонів. Але залишається питання впливу на ефективність очистки пульсаційних параметрів турбулентного газового потоку.

Альтернативний варіант вирішення проблеми, викладений в [8, 9], передбачає використання умов осадження частинок пилу у наближенні «дифузійного прикордонного шару», значно ближче до створення найбільш точнішого аналітичного методу розрахунку. Проте, він не враховує величини середньої по поперечному перерізу вхідного патрубку циклона швидкості поперечних пульсацій турбулентного газового потоку перед «дифузійним прикордонним шаром». Також дає значно складнішу схему розрахунку величини діаметра «відсікання» $\langle d_{\eta=50} \rangle$.

На думку авторів роботи [10], розрахунок величини діаметра «відсікання» $\langle d_{\eta=50} \rangle$ повинен виконуватися по кінцевій швидкості пульсацій газу після їх проходження через «дифузійний прикордонний шар». Це призводить до деяких неточностей розрахунків.

Таким чином, результати літературного аналізу дозволяють зробити висновок про те, що існуючі аналітичні методи розрахунку циклонів не враховують вплив найважливішої величини турбулентної течії [11, 12]. А саме – величини середньої по поперечному перерізу вхідного патрубку циклона швидкості поперечних пульсацій турбулентного газового потоку [13, 14].

5. Методи дослідження

Для розгляду проблеми розробки найбільш точнішого методу розрахунку ефективності очистки в циклонах введемо наступні позначення:

- a – ширина вхідного патрубку циклона (в долях від діаметра циклона);
- b – висота вхідного патрубку циклона (в долях від діаметра циклона);
- $D_{\text{ц}}$ – діаметр циклона;
- $D_{\text{е}}$ – діаметр вихлопного патрубку циклона (в долях від діаметра циклона);

- $d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр вхідного патрубку циклона;
- d_{50} – медіанний діаметр золи;
- $d_{\eta=50}$ – діаметр «відсікання» або діаметр частинок золи, що вловлюються в циклоні з ефективністю 50 %;
- t – температура; параметр пофракційного ступеня очистки;
- V – швидкість;
- E – коефіцієнт захвата частинки перепonoю (поверхнею циклона; джгутом пилу);
- η – ефективність очистки;
- μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;
- u_* – динамічна швидкість газового потоку у вхідному патрубці циклону;
- $u_{n.n.}$ – середня, за поперечним перерізом вхідного патрубку циклона швидкість поперечних пульсацій турбулентного газового потоку;
- ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості;
- ρ – щільність;
- σ_n – стандартне відхилення розподілу частинок пилу по розмірам;
- σ_η – стандартне відхилення розподілу пофракційного ступеня очистки;

Індекси:

p – розрахунок; e – експеримент; vx – на вході в циклон; z – газ; n – пил; $фр$ – фракційний.

Скорочення:

екв – еквівалентний; Stk – критерій Стокса; заг – загальний.

6. Результати дослідження

Найбільш поширений для аналітичних розрахунків ефективності циклонів від пилу отримав імовірнісний метод розрахунку, заснований на використанні логарифмічно нормального закону, як функції розподілу частинок пилу по розмірам. Крім того, використовується також і залежність ефективності пиловловлювання в циклоні від діаметра «відсікання» ($d_{\eta=50}$), тобто частинок пилу, які вловлюються циклоном на 50 % [1]. При використанні цього метода розрахунку потрібні дані о двох параметрах, характеризуючих дисперсність пилу, який вловлюється (d_{50} , σ_n) – відомі чи які задаються, та дані о двох параметрах, характеризуючих ефективність циклона – « $d_{\eta=50}$ » та « $lg\sigma_\eta$ ».

Величину « $lg\sigma_\eta$ » для різних циклонів можна прийняти постійною та рівною 0,35. Параметр же « $d_{\eta=50}$ » є єдиною величиною, що підпадає до визначення експериментально чи розрахунково, та для деяких циклонів, після відповідних експериментальних досліджень, приведених в спеціальній довідковій літературі [1].

За цими чотирма параметрами визначається величина розрахункового параметра « t » [1]:

$$t = \frac{\lg d_{50} - \lg d_{\eta=50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_n + \lg^2 \sigma_\eta}}. \quad (1)$$

Загальний ступінь очистки газового потоку від пилу в циклоні остаточно розраховується згідно залежності [1]:

$$h_{\text{заг}} = \Phi(t) = \frac{1}{2} \pi (\exp)^{-\frac{t}{2}} dt, \quad (2)$$

де $\Phi(t)$ – інтеграл Гауса, який визначається зі спеціальних імовірнісних таблиць [1].

При розробці теорії циклонної очистки та удосконаленню їх конструкцій не враховувалось значний вплив на ефективність очистки гідродинамічної обстановки на струйній ділянці циклона (в зоні входу газового потоку в корпус циклона). Тому удосконалення циклонів були, переважно, направлені на вивчення впливу двох інших ділянок циклона (корпуса циклона та вихлопного патрубка). Хоча, як було відзначено в [3], недооблік впливу *струйної* ділянки циклона, наприклад на теплообмін, призводить до значних помилок розрахунків (до 40 %).

Оскільки процеси переносу субстанції (концентрації, тепла, швидкості) описуються законом конвективної дифузії Фіка, опосередковано можливо судити про визначальний вплив початкової ділянки на інтенсивність процесу уловлювання пилу. Так, наприклад, при розгляді закономірностей переносу тепла по даним роботи [4], де відмічається, що на відстані 0,25 м від вхідного патрубка по ходу газу, щільність теплового потоку та коефіцієнт тепловіддачі зменшувався в 2–3 рази. При цьому, в циклоні з одним вхідним патрубком – в 2 рази та в 3 рази – в циклоні з чотирма вхідними патрубками – в порівнянні з аналогічною величиною в кінці початкової ділянки формування турбулентності.

В дослідженнях [2, 5] кількісно оцінено внесок в циклонах струйної (початкової) ділянки циклонних камер на ефективність очистки від пилу, де відзначається, що при повороті газового потоку на 150° на стінці циклону осідає основна маса пилу. Приблизно, 70 % пилу осідає на першій чверті окружності циклона при повороті потоку на 90° та ще 20 % – на подальшому повороті потоку на 45° .

Це дає підставу зробити висновок в тім, що на ефективність циклонів визначальний вплив надає саме початкова струменева ділянка циклонних камер. Тому при побудові різних аналітичних методів розрахунку ефективності очистки від пилу у циклонах слід враховувати закономірності осадження пилу саме на початковій струменевій ділянці циклонів.

Дана робота є продовженням раніш запропонованого метода розрахунку ефективності циклонів [8–10]. В цих роботах використовувались характеристики турбулентних течій та закономірностей процесу осадження частинок пилу на стінці циклона, на поверхні «джгуту» пилу у «дифузійному прикордонному шарі».

Дана робота спрямована на розробку нового найбільш точного вдосконаленого методу розрахунку ефективності циклонів з використанням основних характеристик турбулентного потоку. Так, були використані швидкість поперечних пульсацій турбулентного потоку у вхідному патрубці

циклона, динамічна швидкість пульсацій газового потоку та ін. При цьому, процес осадження частинок пилу виконувався у наближенні «дифузійного прикордонного шару».

Для цього скористаємося концепцією вільного інерційного польоту частинок з турбулентного потоку газу на осаджувальній поверхні (стілки циклона, на поверхні «джгута» пилу), яка отримала широке використання при вивченні процесу турбулентного осадження аерозолів [9, 13]. Вперше ця концепція була висловлена в роботі [14], котра зводиться до утвердження в тому, що в пристінковій зоні турбулентного потоку має місце інерційний викид частинок пилу з несущих їх турбулентних вихорів в напрямку поверхні циклону.

До даної ідеї привела авторів відома схема Прандтля, згідно якої турбулентний потік підрозділяється на дві відокремлені області – турбулентне ядро течії та ламінарний прошарок у стінці, остачі позбавленою турбулентних пульсацій. Згідно з цією схемою поблизу ламінарного шару у стінки циклону турбулентні вихори пригальмовують свій рух до нуля, а зважені частинки пилу в силу інерції продовжують свій шлях через загальмований шар аж до стінки циклона [13].

Автори роботи [10] припустили, що викид частинок пилу до стінки відбувається з початковою швидкістю, рівною середній по поперечному перерізу труби швидкості поперечних пульсацій турбулентного потоку, тобто з $u_{n.n.} = 0,9u_*$ [13].

В даній роботі запропонована аналогічна схема поведінки частинок пилу поблизу осаджувальної поверхні циклону. При цьому, виконана кількісна оцінка правомірності застосування такого метода розрахунку ефективності циклонних пиловловлювачів для 19-ти найбільш широко застосовуваних циклонних пиловловлювачів, наведених в [9].

Оцінка для циклонів величини « $d_{\eta=50}$ » виконана з урахуванням закономірностей руху частинок пилу в «дифузійному прикордонному шарі». При цьому, використовувались величини швидкості поперечних пульсацій турбулентного потоку у вхідному патрубці циклона, останнім часом успішно розвинутих в роботах [8, 10], які дають найбільш точні аналітичні розрахункові залежності. Також при цьому передбачається, що до кордону «дифузійного прикордонного шару» частинки доставляються за рахунок механізму конвективної дифузії і впливу турбулентних пульсацій газового потоку. В «дифузійному прикордонному шарі» частинки рухаються до осаджувальної поверхні циклону, приблизно, з постійною швидкістю, прийнятою рівною середній по поперечному перерізу труби швидкості поперечних пульсацій турбулентного потоку, а саме $0,9u_*$. Окрім того, рахується, що кінцева швидкість часток (при їх торканні стінки циклону або поверхні «пилового джгута») не нульова [13, 14]. Підставою для цього послужила гіпотеза про існування періодичного вторгнення великомасштабних вихорів з ядра в пристінну область. При прийнятому допущенні довжина свobodного інерційного пробігу частинки дорівнює:

$$l = 0,9u_*$$

Тоді величина отриманої таким методом кінцевої швидкості частинок (при їх торканні стінки циклону чи поверхні пилового «джгута») і є визначальною величиною при оцінці ймовірності їх осадження. В такому разі ефективність очистки здійснюється за рахунок спільного впливу механізмів конвективної дифузії та інерційних сил.

У даній роботі запропоновано вдосконалений метод розрахунку ефективності уловлювання пилу в циклоні, заснований на використанні характеристик турбулентності течій. Також використовуються закономірності процесу осадження частинок пилу на перешкоді (стінці циклону, на поверхні «джгута» пилу) в «дифузійному прикордонному шарі».

Розрахунок ефективності уловлювання пилу в циклонних апаратах за новим методом пропонується виконувати у наступній послідовності:

– еквівалентний діаметр вхідного патрубку циклона [8, 14]:

$$d_{екв} = \frac{2av}{(a+v)} D_{ц}; \quad (3)$$

– динамічна пульсаційна швидкість газового потоку у вхідному патрубці циклону – визначається по залежності [9]:

$$u_* = \frac{0,354u_{ex}}{1,8 \lg Re - 1,64}, \quad (4)$$

де

$$Re = \frac{u_{ex} d_{екв}}{\nu_z}; \quad (5)$$

– середня по поперечному перерізу вхідного патрубку циклона швидкість поперечних пульсацій турбулентного газового потоку [13]:

$$u_{n.n.} = 0,9u_*; \quad (6)$$

– критерій Стокса [1]:

$$S_{tk} = \frac{d_n^2 u_{n.n.} \rho_n}{18 D_{np} \nu_r} \quad (\text{при } D_{np} = 10^{-4} \text{ м [15]}); \quad (7)$$

– коефіцієнт інерційного захоплення частинок пилу « E » – за отриманою автором найбільш точною інтерполяційною залежністю при потенційному режимі обтікання у вхідному патрубку циклонних апаратів:

$$E = \left(\frac{S_{tk}}{S_{tk} + 0,24} \right)^2. \quad (8)$$

Слід зазначити, що є і ряд інших залежностей для оціночних розрахунків величини коефіцієнта захвату частинок на перешкодах « E » при потенційному режимі обтікання і найбільш відомі з них наведені нижче:

– за даними [11] для оціночних розрахунків коефіцієнта захоплення великими краплями рідини дрібних частинок пилу в скруберах Вентурі при потенційному режимі обтікання:

$$E = \left(\frac{Stk}{Stk + 0,59} \right)^2; \quad (9)$$

– за даними [16] для оціночних розрахунків коефіцієнта захоплення кулястих частинок в дисперсно-кільцевому потоці:

$$E = \left(\frac{Stk}{Stk + 0,125} \right)^2; \quad (10)$$

– за даними [12]:

$$E = \left(\frac{Stk}{Stk + 0,135} \right)^2. \quad (11)$$

Аналіз залежностей (8)–(11) показав, що формула (8) дає найбільш точну оцінку величини коефіцієнта « E » інерційного захоплення частинок пилу перешкодою при потенційному режимі обтікання у вхідному патрубку циклонних апаратів. Це стосується, як оцінки величини діаметра «відсікання» ($d_{\eta=50}$), так і оцінки величини діаметра ($d_{\eta=84}$), що визначає важливу для розрахунку циклонів величину $lg \sigma_{\eta}$. Крім того, помилки в оцінці величини $lg \sigma_{\eta}=0,35$ (при $\sigma_{\eta}=2,24$), наприклад, для циклону типу «ЦН-15» склали для формул (8), (10), (11), відповідно 1,78 %; 30,6 %; 17,3 %, що також підтверджує більш високу точність розрахунків формули (8).

З рішення рівняння (8) випливає, що при $E=0,5$, $Stk=0,59$, величина діаметра «відсікання» ($d_{\eta=50}$) визначається з рішення рівняння (7) для оцінки критерію « Stk » при значенні величини $E=0,5$ ($\eta=0,5$). Тобто, коли $E = \eta = 0,5$, величина $d_{\eta=50}$ може бути визначена згідно залежності:

$$d_{\eta=50} = \sqrt{\frac{18 \cdot D_{np} \cdot \nu_r \cdot Stk_{\eta=50}}{p_n \cdot 0,9u_*}} \quad (12)$$

якщо врахувати, що оптимальна величина для $D_{np} = 100 \cdot 10^{-6}$ м [15], а $E=0,5$, $Stk_{\eta=50} = 0,59$ [11], то:

$$d_{\eta=50} = \sqrt{\frac{18 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot v_r \cdot 0,59}{\rho_n \cdot 0,9u_*}} \cdot 10^{-8} \text{ м}; \quad (13)$$

– величина $d_{\eta=50}^{жс)}$, з урахуванням впливу величин $D_{ц}$ та D_e , розраховується згідно залежності [9]:

$$d_{\eta=50}^{жс)} = d_{\eta=50} \left(\frac{D_e}{0,59} \right) \left(\frac{D_{ц}}{0,6} \right)^{1/4}; \quad (14)$$

– за двома параметрами ($d_{\eta=50}$ і σ_{η}), а також двома параметрами дисперсності вловлюємого пилу (d_{50} і σ_n), визначається величина допоміжного розрахункового параметра « t » за залежністю (1):

$$t = \frac{\lg d_{50} - \lg d_{\eta=50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_n + \lg^2 \sigma_{\eta}}};$$

– загальна ступінь очистки газового потоку від пилу в циклоні остаточно розраховується згідно залежності [9]:

$$\eta_{заз} = 50 + 44t - 10(t)^2, \text{ (для } t \leq 2); \quad (15)$$

$$\eta_{заз} = 105,4 - \frac{15}{t}, \text{ (для } t > 2). \quad (16)$$

В табл. 1 наведені експериментальні та розраховані із запропонованої в даній роботі методики розрахунку значень величин $d_{\eta=50}^p$ та $d_{\eta=50}^p$. Такі розрахунки виконані для 19-ти найбільш поширених в промисловості циліндро-конічних та конічних циклонів, наведених в [9].

Середня помилка оцінки розрахункової величини $d_{\eta=50}^p$, для наведених в табл. 1 циклонів (19 шт.) склала 6,7 %, що нижче наведених для цих же 19-ти циклонів в роботі [9] середньої помилки 7,52 %.

Величини « $d_{\eta=50}^p$ », запропоновані Державний науково-дослідний інститут з промислової та санітарної очистки газів (НДІОГАЗ, Київ, Україна), розраховуються згідно залежності:

$$d_{\eta=50}^p = 64,35 \zeta^{-0,51}, \quad (17)$$

для умов: $D_{ц} = 0,6$ м; $V_{ц} = 3,5$ м/с; $\mu_{г} = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\rho_n = 1930$ кг/м³.

При необхідності перерахунок на інші умови може бути здійснений за формулою:

$$d_{\eta=50}^{жс)} = d_{\eta=50}^p \sqrt{\frac{D_{ц}^{жс)} \cdot 3,5}{0,6 \cdot V_{ц}^{жс)}} \cdot \frac{\mu_{г}^{жс)}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1930}{\rho_n^{жс)}}} \quad \text{МКМ},$$

де величини, відмічені знаком ^{ж)}, які відповідають умовам роботи циклонного золовловлювача.

Таблиця 1

Оцінка ефективності очистки в циклонах різних конструкцій

Номер циклона	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№9	№10
а	0,26	0,26	0,26	0,2	0,26	0,18	0,264	0,21	0,2	0,26
в	0,66	0,48	1,1	0,6	0,8	0,4	0,535	0,52	0,4	0,7
$D_{ц}, м$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,6	0,6
$d_{екв}, м$	0,224	0,202	0,25	0,18	0,236	0,149	0,212	0,18	0,427	0,228
D_e	0,59	0,59	0,59	0,59	0,5	0,22	0,33	0,34	0,203	0,5
ζ	160	250	80	210	92	2000	600	1270	4420	115
$\rho, кг/м^3$	1930	1930	1930	1930	2650	1930	1930	1930	2300	2200
$v_r \cdot 10^6, м^2/с$	25	25	25	25	15,3	25	25	25	35,53	15,3
$u_{cp}, м/с$	3,5	3,5	3,5	3,3	5,4	3,5	3,5	3,5	1,6	4,77
$u_{вх}, м/с$	16	22	9,6	21,6	20,4	38,2	19,5	25,16	15,7	20,57
$d_{\eta=50}^p, мкм$	4,5	3,65	8,5	4,12	2,75 ^{ж)}	1,13	2,31	1,95	2,27 ^{ж)}	3,0 ^{ж)}
$d_{\eta=50}^p, мкм$ $\Delta d_{\eta=50}, \%$	4,5 0	1,37 1,37	5,74 32	3,923 4,77	2,767^{ж)} 0,62	1,12 0	2,318 0	2,11 8,15	2,08^{ж)} 7,96	2,91^{ж)} 3,0
Номер циклона	№ 11	№ 12	№ 13	№ 14	№ 15	№ 16	№ 17	№ 18	№ 19	
а	0,16	0,2	0,25	0,25	0,26	0,223	0,182	0,104	0,2	
в	0,38	0,4	0,5	0,28	1,0	0,41	0,527	0,586	0,52	
$D_{ц}, м$	0,3	0,3	0,2	0,8	0,37	0,3	0,55	0,512	0,25	
$d_{екв}, м$	0,067	0,08	0,07	0,211	0,153	0,087	0,149	0,0906	0,0722	
D_e	0,4	0,187	0,5	0,38	0,5	0,325	0,545	0,533	0,48	
ζ	1300	1900	237	1640	85	985	425	130	130	
$\rho, кг/м^3$	2600	1000	2200	2650	2650	2650	2070	3100	2650	
$v_r \cdot 10^6, м^2/с$	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	34,0	15,3	15,3	
$u_{cp}, м/с$	1,6	1	2,8	1,3	3,5	2,33	3,6	3,2	3,4	
$u_{вх}, м/с$	20,66	9,81	17,0	14,6	10,57	20	29,5	9,66	25,7	
$d_{\eta=50}^p, мкм$	1,39 ^{ж)}	1,27 ^{ж)}	2,4 ^{ж)}	2,4 ^{ж)}	3,37 ^{ж)}	1,85 ^{ж)}	3,0 ^{ж)}	2,79 ^{ж)}	1,64 ^{ж)}	
$d_{\eta=50}^p, мкм$ $\Delta d_{\eta=50}, \%$	1,48^{ж)} 6,9	1,51^{ж)} 7,0	2,6^{ж)} 1,83	2,22^{ж)} 7,5	3,74^{ж)} 3,64	1,73 ^{ж)}	3,38^{ж)} 12,67	3,9^{ж)} 7,52	1,57 4,09	

Примітка: № 1 – ЦН-15 [1]; № 2 – ЦН-11 [1]; № 3 – ЦН-24 [1]; № 3 – ЦКТИ (Ц) [9]; № 5 – МІОТ [9]; № 6 – МІОТ [9]; № 7 – СК-ЦН-34М [1]; № 8 – СК-ЦН-33 [1]; № 9 – [9]; № 10 – [9]; № 11 – СЦН-40 [9]; № 12 – [9]; № 13 – РІСІ [9]; № 14 – УЦ-38; № 15 – ВЦНПОП [9]; № 16 – [9]; № 17 – [9]; № 18 – [9]; № 19 – [9]

Середня похибка за запропонованою НДЮГАЗ залежності (17), при оцінці величини « $d_{\eta=50}$ » для наведених в табл. 1 цих же циклонів (19 шт.), склала 21,46 % [9]. Це в 3,2 рази вище, ніж при розрахунках величини $d_{\eta=50}$ по залежності (8).

Слід зазначити, що, крім високої точності розрахунків, новий метод розрахунку дозволяє прогнозувати величину « $d_{\eta=50}$ » при зміні ступеня турбулентності газового потоку на вході в циклон, що неможливо при використанні відомих методів розрахунків циклонів.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Позитивним ефектом від проведених досліджень є більша точність аналітичних розрахунків ефективності очистки різних циклонів як на стадії проектування, так і в промислових умовах роботи систем очистки.

Weaknesses. Негативним фактором дослідження є те, що висновки роботи слід поширити на більшу кількість конструкцій циклонів та умов по дисперсності пилу та характеристикам газових потоків.

Opportunities. При впровадженні результатів дослідження в ряді випадків можливо значно скоротити капітальні витрати на придбання більш коштовного очисного устаткування електрофільтрів, рукавних фільтрів. Це дасть підприємствам економію значних коштів. Результати роботи можуть бути цікавими не тільки для України.

Threats. При впровадженні результатів дослідження додаткові витрати, практично, не потребуються.

8. Висновки

1. Зроблено аналіз впливу середньої по поперечному перерізу вхідного патрубку циклона величини швидкості поперечних пульсацій турбулентного газового потоку у вхідному патрубку циклона [2, 13] на величину діаметра «відсікання» « $d_{\eta=50}$ » [1]. Встановлено, що найбільший вплив на величину діаметра «відсікання» « $d_{\eta=50}$ », а також на ефективність очистки надає величина швидкості поперечних пульсацій турбулентного газового потоку у вхідному патрубку циклона [2, 13].

2. Запропонований удосконалений метод розрахунку ефективності очистки циклонів від пилу засновано на використанні характеристик турбулентних течій та ефективності процесу осадження частинок пилу на перешкоді (стінці циклону, на поверхні «джгута» пилу) в наближенні «дифузійного прикордонного шару». Це дозволяє з високою точністю розрахувати ефективність очистки в циклонах від промислових пилів, значно зменшити витрати часу та обсяг експериментальних робіт при розробці нових видів циклонів чи їх підбору при вирішенні різних задач в області механіки аерозолів. За допомогою використання найбільш точніших експериментальних даних ефективності очистки повітря від пилу в різних циклонах [1, 9] обґрунтовано переваги цього методу для розрахунку загального ступеня золовловлювання в різних по конструктивному виконанню циклонах та різних параметрів пилу та газів. При оцінці точності розрахунків методик розглянуті результати розрахунків по найбільш точнішому методу [9, 10]. Показано, що середня точність в оцінці величини $d_{\eta=50}$, на 12 % вище, ніж в [9, 10].

Література

1. Русанов, А. А. (Ред.) (1983). *Справочник по пыле- и золоулавливанию*. Москва: Энергоатомиздат, 312.
2. Василевский, М. В. (2008). *Обеспыливания газов инерционными аппаратами*. Томск: Издательство Томского Политехнического Университета, 258.
3. Халатов, А. А. (1989). *Теория и практика закрученных потоков*. К.: Наук. думка, 192.
4. Вальдберг, А. Ю., Кирсанова, Н. С. (1989). К расчету эффективности циклонных пылеуловителей. *Теоретические основы химической технологии*, 23 (4), 555–556.
5. Разва, А. С. (2009). *Оценки гидродинамических параметров циклонных потоков и разработка новых технических решений инерционных пылеуловителей*. Томск, 19.
6. Priemov, S. I. (1997). The Calculation Method for Cyclone Type Dust Collectors. *Heat Transfer Research*, 28 (4-6), 371–375. doi: <https://doi.org/10.1615/heattransres.v28.i4-6.230>
7. Kurkin, V. P. (1991). Design of cyclone dust collectors. *Chemical and Petroleum Engineering*, 27 (7), 398–399. doi: <https://doi.org/10.1007/bf01262673>
8. Приемов, С. И. (2011). Использование колмогоровского масштаба турбулентности в качестве параметра эффективности улавливания пыли в циклонных аппаратах. *Промышленная теплотехника*, 33 (3), 86–92.
9. Приемов, С. И. (2014). *Методы расчета эффективности очистки циклонных пылеуловителей*. К.: Кафедра, 132.
10. Рижов, В. І., Тимошенко, А. Г., Приёмов, С. І. (2015). Оптимізація системи очистки димових газів. *Вісник Університету «Україна». Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика*, 1 (17), 116–129.
11. Литвинов, А. Т. (1969). Об оценке эффекта захвата крупными частицами или каплями жидкости мелких частиц и о влиянии гидрофильности частиц на коэффициент захвата. *ИФЖ*, 16 (6), 1052–1061.
12. Сугак, Е. В., Войнов, Н. А., Житкова, Н. Ю. (2000). Очистка газовых выбросов от высокодисперсных частиц в дисперсно-кольцевом канале. *Химия растительного сырья*, 4, 85–101.
13. Медников, Е. П. (1980). *Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей*. М.: Наука, 176.
14. Заостровский, Ф. П., Шабалин, К. Н. (1951). Скорость улавливания пыли в скрубберах. *Химическая промышленность*, 5, 148–149.
15. Фукс, Н. А. (1955). *Механика аэрозолей*. М.: Изд-во АН СССР, 352.
16. Фрумкин, Ф. Л. (1955). Некоторые вопросы очистки рудничного воздуха от витающей пыли при помощи орошения. *Изв. АН СССР, ОНТ*, 11, 129–134.