

УДК 621.928.9

Д.О. Серебрянський, С.В. Плашихін

СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО ФІЛЬТРА І ЦИКЛОФІЛЬТРА ПРИБУЛОВЛЮВАННІ ЗОЛИ ТВЕРДОПАЛИВНОГО КОТЛА

The paper presents the results of bench tests of the centrifugal filter and cyclofilter and further settlement and comparative analysis of these devices with the most common in the former USSR typical NDIOHAZ cyclones. Relying on a single technique, we conduct the comparative testing of centrifugal filter CF1-6-0,15 and cyclofilter in the laboratory of the Institute of Engineering Thermophysics under the NAS of Ukraine. We employ ash as a contaminating material deposited behind the BKZ-220-140-Hz boiler economizer of the Cherkasy TPP and sampled during the boiler blowing-out. Through the bench tests, we obtain aerodynamic and concentration characteristics of ash collectors. When designing the purification systems depending on the specific technical conditions, we propose the ash removal in the cyclofilter of aerodynamic resistance 170 Pa for the inclusion coefficient 3,6 % or in the centrifugal filter with the aerodynamic resistance 860 Pa at the inclusion coefficient 1,5 %.

Вступ

На димові і технологічні гази вугільної теплоенергетики, чорної металургії і будівельної індустрії разом припадає більше 90 % загальної кількості викидів в атмосферу золи і пилу. Локальні забруднення повітря золою і пилом – одна з найбільш тривожних сучасних проблем.

Тверді частинки можуть накопичуватися і переміщатися на довільні відстані. Вони здатні впливати на екологічну обстановку в локальному і глобальному масштабах, про що свідчать наслідки аварії на ЧАЕС. Існуючий парк золувловлювального устаткування, що розміщений на українських ТЕС, які працюють на вугіллі, недостатньо ефективний і економічний та не задовольняє сучасні санітарні вимоги. На сьогодні ця проблема залишається актуальною. Її вирішення може бути досягнуте створенням нових високоефективних апаратів для комплексного очищення газів від твердих частинок згідно з вимогами санітарних норм на викиди в атмосферу [1–6].

У лабораторії “Очищення газових викидів в промисловій енергетиці” Інституту технічної теплофізики НАН України проводяться роботи з удосконалення систем і апаратів очищення газів від твердих частинок різних галузей промисловості.

Твердопаливні котли малої потужності, що використовуються переважно в системах житлового господарства, як правило, обладнані одноступеневою системою золувловлювання, яка представлена, в основному, типовими циклонами НДІОГАЗ, поки що не здатними задовольняти вимоги до залишкової запиленості димових газів згідно з директивою ЕС 2001/80/ЕС.

Твердопаливні котли енергоблоків ТЕС оснащені системами газоочистки, що складаються з електрофільтра або батарейного циклона, на деяких станціях встановлено скрубери Вентурі. На сьогодні залишкова запиленість за газоочистками котлів ТЕС перевищує в рази нормативи, встановлені відповідно до наказу Мінприроди від 22.10.2008 № 541.

Постановка задачі

Метою дослідження є проведення стендових випробувань відцентрового фільтра і циклофільтра та подальший розрахунково-порівняльний аналіз цих апаратів з найбільш поширеними в країнах колишнього СРСР типовими циклонами НДІОГАЗ.

Методика й аналіз результатів стендових випробувань відцентрового фільтра і циклофільтра

Для очищення газів від високодисперсних частинок золи і пилу в лабораторії ІТТФ НАН України розроблено пиловловлювачі нової конструкції: відцентровий фільтр і циклофільтр [1, 2].

В основі конструкції відцентрових фільтрів лежить система послідовно сполучених криволінійних каналів з однаковими кутами повороту $\varphi_i = \pi$ і рівними площами поперечних перетинів (рис. 1) [2]. Канали утворюються двома плоскими стінками і циліндричними напівобичайками різної кривизни. Замкнений контур виникає в двох сусідніх каналах за наявності ексцентриситету між осями обертання непарних і парних напівобичайок (рис. 1).

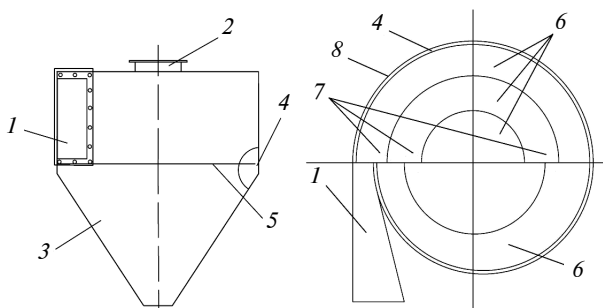


Рис. 1. Відцентровий фільтр в чотирьохканальному виконанні: 1 – вхідний патрубок; 2 – вихідний патрубок; 3 – конічний бункер; 4 – кільцева щілина; 5 – днище голівки; 6 – криволінійний канал; 7 – рециркуляційні щілини; 8 – сепараційна камера

Відцентровий фільтр працює таким чином: запилений газовий потік по тангенціальному вхідному патрубку 1 поступає в камеру сепарації 8. Внаслідок руху по криволінійній траєкторії тверді частинки концентруються на периферії кожного з каналів 6 і виводяться з них через зазори 7 в попередній за ходом руху потоку канал. З першого і другого за ходом потоку каналів 6 пил разом із частиною газу поступає через кільцеву щілину 4 в циліндричний бункер – пилосбірник 3, де значна кількість частинок осідає, а найбільш легкі (дрібні) фракції, що продовжують витати, повертаються через щілини 7 в зону активної сепарації (канали) і знову сепаруються. В результаті організації внутрішніх (циркулюючих) потоків у системі каналів утворюється динамічний газопило-

вий шар, який і є фільтром для частинок, що знову поступають на очищення газу.

Для стендових порівняльних випробувань був виготовлений відцентровий фільтр у шестиканальному виконанні на витрату газів, що очищаються, до $150 \text{ м}^3/\text{год}$ (ЦФ1-6-0,15). Загальний вигляд установки подано на рис. 2.

Комплексна очистка димових газів від твердопаливних котлів відповідно до вимог директиви ЕС 2001/80/ЕС можлива при використанні високоефективних фільтрувальних матеріалів. Поєднання відцентрової попередньої очистки від крупнодисперсних частинок золи з тонкою очисткою в слідуючому за нею фільтрі реалізовано в апараті нової конструкції – циклофільтрі.

Основа циклофільтра – гофрований фільтр-патрон, обладнаний системою регенерації, розміщений у модифікованому циклоні з подвійним корпусом. В такому апараті реалізований високоефективний перший ступінь (циклонний) за рахунок евакуації пилу в першій чверті циклонного елемента в окремий від основного потоку бункер. Завдяки цьому термін роботи такого модифікованого циклону буде значно довшим, ніж у типового (наприклад, ЦН).

У циклофільтрі співвісно один одному розміщені циліндричні корпуси циклонних елементів, з'єднаних між собою жалюзійним елементом, що містяться в першій чверті діаметра апарата, та внутрішнім гофрованим фільтр-елементом, який виконаний з паперового або тканинного фільтрувального матеріалу. Циклофільтр

(рис. 3) працює таким чином: запилений газовий потік потрапляє по вхідному патрубку 1 у внутрішній циліндричний корпус апарата 2. За рахунок відцентрових сил, що діють на частинки пилу, останні концентруються в першій чверті діаметра циліндра та через щілинні вікна 8 відводяться у зовнішній циліндричний корпус 3. Таким чином, крупнодисперсна фракція осідає в бункері 5. Очищений від крупнодисперсної фракції пилу потік, обертаючись у внутрішньому циліндричному корпусі апарата, фільтру-

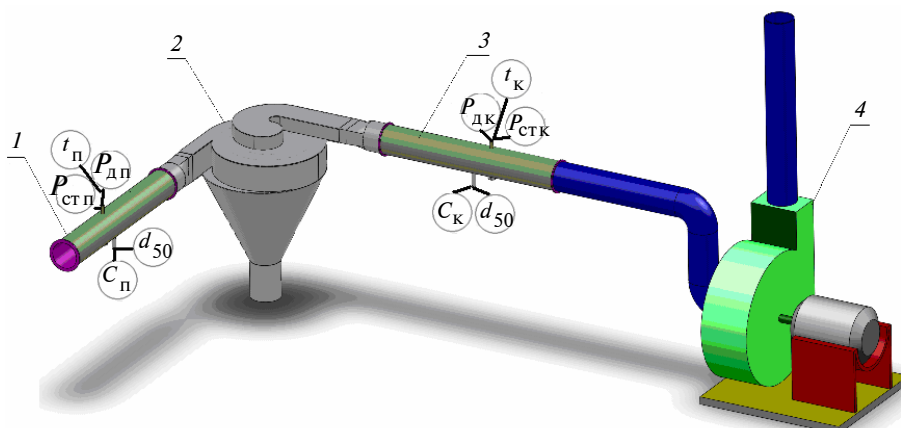


Рис. 2. Експериментальний стенд з відцентровим фільтром ЦФ-1-6-0,15: 1 і 3 – вимірвальні газоходи на вході і виході з відцентрового фільтра, 2 – відцентровий фільтр ЦФ-1-6-0,15, 4 – відцентровий вентилятор; t_p , t_k – початкова і кінцева температури, G_p , G_k – початкова і кінцева концентрації, $P_{стп}$, $P_{стк}$ – початковий і кінцевий статичний тиск, $P_{дп}$, $P_{дк}$ – початковий і кінцевий динамічний тиск

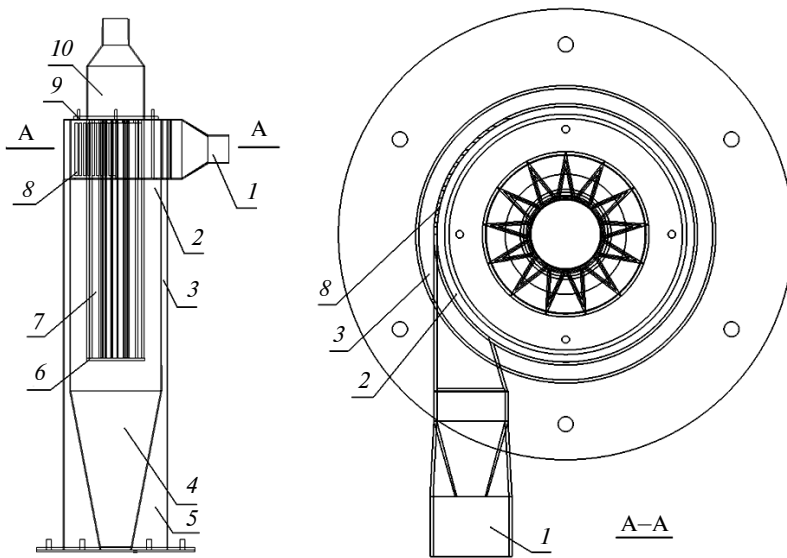


Рис. 3. Конструкція циклофільтра: 1 – вхідний патрубок; 2 – внутрішній циліндричний корпус; 3 – зовнішній циліндричний корпус; 4 – внутрішній бункер; 5 – зовнішній бункер; 6 – фільтр-патрон; 7 – система регенерації фільтр-патрона; 8 – щільові вікна; 9 – опорна шайба; 10 – вихідний патрубок

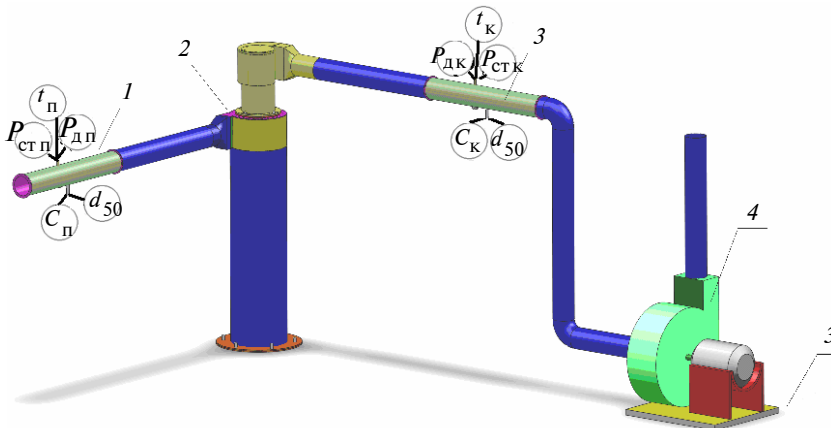


Рис. 4. Експериментальний стенд з циклофільтром: 1 і 3 – вимірювальні газоходи на вході і виході з циклофільтра, 2 – циклофільтр, 4 – відцентровий вентилятор

ється у встановленому в його центрі гофрованому фільтр-патроні та виходить очищеним з вихідного патрубка 10, розміщеного на опорній шайбі 9.

Система регенерації фільтр-патрона 7 – імпульсна з ресивером стислого повітря, електромагнітними клапанами (на креслені не вказано), соплами Вентурі, продувними трубами з соплами на кінцях і блоком керування регенерації (на креслені не вказано), з'єднаними із загальним компресором, що керує роботою фільтра в усіх режимах фільтрації, причому надлишковий тиск стислого повітря становить

приблизно $P_n = 0,4-0,8 \text{ МПа}$, тривалість імпульсу – $\tau = 0,1-0,2 \text{ с}$.

За єдиною методикою [3, 4] в лабораторії ІТФ НАН України були проведені порівняльні випробування відцентрового фільтра ЦФ1-6-0,15 [3] і циклофільтра на продуктивність до $150 \text{ м}^3/\text{год}$. Слід зазначити, що в циклофільтрі при випробуваннях не встановлювався фільтрувальний патрон, тобто визначалася його відцентрова складова очищення. Загальний вигляд стенда з циклофільтром наведено на рис. 4.

Порівняльні випробування були проведені на золі, що осіла за економайзером котла БКЗ-220-140-ГЦ Черкаської ТЕС та була відібрана під час зупинки котла. Зола подавалася у вимірювальний газохід 1 шнековим живильником з двигуном постійного струму. Частота обертання пружини була відтарована на подачу золи $17-34 \text{ г/хв}$, що відповідало концентрації до 10 г/м^3 (концентрація вибиралася з реальних максимальних значень за діючим котлом ЧТЕС).

З наявних даних про дисперсний склад золи від котлів подібного типу при спалюванні бурого вугілля Харанорського родовища (нижча теплота згорання палива $Q_n^p = 13,7 \text{ МДж}$; зольність палива $A_p = 6,8 \%$; вологість палива $W_p = 39,7 \%$) зола, утворена в результаті спалювання, характеризується медіанним діаметром $d_{50} = 36 \text{ мкм}$ [5]. Визначення дисперсного складу золи Черкаської ТЕС при спалюванні вугілля Донецького басейну проводилося за допомогою семисхідчастого імпактора НДЮГАЗ. Розрахунок дисперсного складу проби пилу проводився за приростами осадженого пилу на кожному з двох рівнів приладу і

на фільтрі. Покладаючи за 100 % сумарну вагу на всіх рівнях приладу визначають обсяг частинок, що осіли на кожних двох рівнях. За отриманими результатами будувалася крива дисперсного складу в імовірно-логірифічній сітці координат (за величиною проскакування у відсотках) і значенням d_{50} кожного рівня [6].

Перерахунок констант рівнів імпактора на робочі умови проводився за формулою

$$d'_{50} = d_{50} \sqrt{\frac{\mu_r}{1,8 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{10}{v_r} \cdot \frac{1350}{\rho_p}},$$

де v_r – витрати проби газу, що відбирається, за умовами потоку; ρ_p – густина пилу; μ_r – в'язкість газу.

При визначенні дисперсного складу досліджуваного пилу за приростом маси в різних рівнях приладу припускається, що в кожному рівні осідають всі частинки діаметром, що перевищує значення d_{50} для даного рівня. Відповідно до цього криву дисперсного складу будують у вигляді кривої “залишків” у координатах $\xi(d) - \lg(d)$, де $\xi(d)$ – вміст частинок діаметром, більшим d . Кожну з k крапок (k – число рівнів) знаходять за допомогою такої формули:

$$\xi_n(d) = \sum_1^n g_n / \sum_1^k g_n,$$

де n – номер рівня, g – вага осаду на n -му рівні.

При побудові кривої “залишків” значення $\xi(d)$ відкладають як координати крапок з абс-

цисами, що відповідають межам розділення d_{50} імовірно-логірифічної сітки координат, в якій по осі абсцис нанесені значення діаметра частинок у логарифмічному масштабі, а по осі ординат – вміст частинок діаметром, більшим d , в імовірно-логірифічному масштабі. За цією кривою визначається вміст різних фракцій пилу у відібраній пробі газу. Результати визначення дисперсного складу пилу наведено на рис. 5.

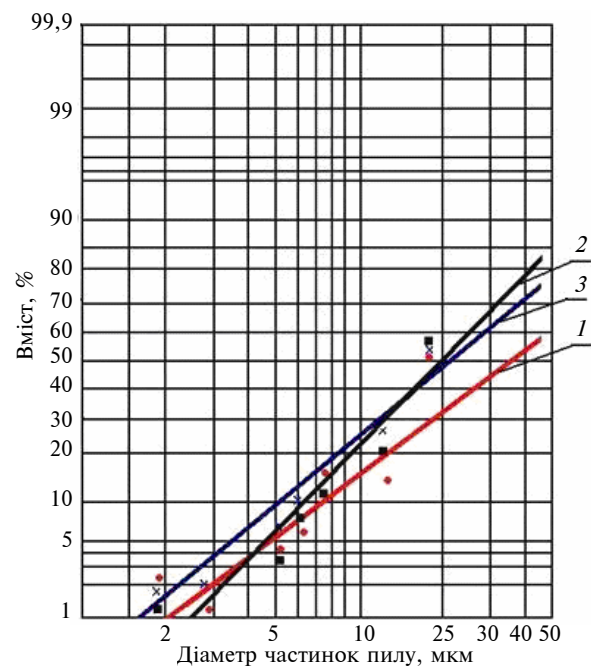


Рис. 5. Дисперсний склад золи ЧТЕС: 1 – зола, що осіла за економайзером котла БКЗ-220-140-ГЦ ЧТЕС; 2 – зола на виході з відцентрового фільтра ЦФ1-6-0,15; 3 – зола на виході з циклофільтра

Таблиця. Результати порівняльних випробувань відцентрового фільтра і циклофільтра з розрахунковими параметрами типових циклонів НДЮГАЗ

Параметр	Тип апарата						
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СКЦН-33	СКЦН-34	Циклофільтр	ЦФ1-6-0,15
Діаметр апарата, м	0,17						0,32
Оптимальні робочі характеристики апаратів							
Швидкість у перерізі апарата $V_{\text{опт}}$, м/с	3,5	3,5	4,5	2	1,7	1,22	0,52
Коефіцієнт опору апарата	220	132	64	500	1150	–	–
Гідравлічний опір апарата ΔP , Па	1695	1017	815	1258	2090	200	950
Характеристики апаратів при $\Delta P \approx 170$ Па							$\Delta P \approx 860$ Па
Витрати газів, м ³ /год	91	117	168	60	40	95	130
Швидкість у перерізі апарата ($V_{\text{факт}}$), м/с	1,11	1,43	2,06	0,735	0,49	1,16	0,45
Ефективність вловлювання, %	95,6	94,8	92,9	97,1	96,5	96,4	98,5
Коефіцієнт зносу, %	4,4	5,2	7,1	2,9	3,5	3,6	1,5

З наведеного розподілу можна зробити висновок, що зола (початкова – відібрана за котлом БКЗ-220-140-ГЦ ЧТЕС) має такі характеристики: медіанний діаметр $d_{50} = 35$ мкм, дисперсність пилу $\sigma_n = 3,5$. Дисперсний склад золи, відібраний з потоку в газозоді експериментальної установки за відцентровим фільтром, має такі характеристики: $d_{50} = 19$ мкм, $\sigma_n = 2,3$. Дисперсний склад золи, відібраний в газозоді експериментальної установки за циклофільтром, має такі характеристики: $d_{50} = 21$ мкм, $\sigma_n = 3$.

У результаті стендових випробувань були отримані аеродинамічні та концентраційні характеристики золовловлювачів: відцентрового фільтра ЦФ1-6-0,15 і циклофільтра. Далі був проведений розрахунковий порівняльний аналіз із типовими циклонами НДЮГАЗ. Результати наведено в таблиці.

Вихідні дані для розрахунку такі: $t = 7$ °С; медіанний діаметр золи – 35 мкм; $\sigma_n = 3,5$; в'язкість газу – $19,5 \times 10^{-6}$ Па·с; густина золи – 2500 кг/м³; аеродинамічний опір циклофільтра без фільтр-патрона ~170 Па; діаметр циклонів – 0,17 м.

З наведеної таблиці можна зробити висновок, що пропускна здатність циклофільтра порівнянна з аналогічним параметром циклона ЦН-11, проте коефіцієнт віднесення золи при цьому в 1,2 разу менший при однаковому рівні енерговитрат.

Коефіцієнт віднесення золи зі спірально-конічного циклона СКЦН-34 практично такий же, як у циклофільтра, однак при цьому пропускна здатність цього циклона в 2,4 разу менша. У зв'язку з цим можна зробити висновок про перспективність і доцільність використання циклофільтра замість типових циклонів НДЮГАЗ.

Особливість конструкції циклофільтра дає змогу в першій чверті повороту газового потоку в середині апарата витягувати концентровану його частину, що порівняно з типовими циклонами значно збільшує термін експлуатації апарата. Слід відзначити, що розподіл за масою вловленої золи між двома ізольованими один від одного бункерами становив 50/50, тобто одна половина вловлюваної золи осідала в зовнішньому бункері за допомогою відведення частини потоку через жалюзійну секцію апарата, інша вловлювалася у внутрішньому циклоні циклофільтра.

Низький аеродинамічний опір циклофільтра в розрахункових оптимальних умовах може бути пояснений тим, що в ньому, на відміну від циклонів, вихлопна труба виконана у вигляді дротяного каркаса для гофрованого фільтр-матеріалу і не заглиблена всередину циклона.

На рис. 6 наведено залежність ефективності очищення від зміни витрати газу, що очищується, в циклофільтрі.

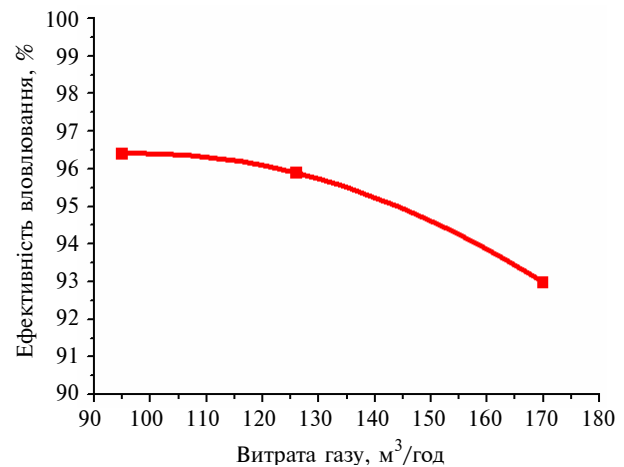


Рис. 6. Залежність ефективності очищення від зміни витрати очищуваного газу в циклофільтрі

З рис. 6 видно, що зі збільшенням витрати очищуваного газу в циклофільтрі ефективність вловлювання знижується. Це свідчить про збільшення навантаження на циклофільтр. Як видно із залежності, в оптимальному режимі (100 м³/год) циклофільтр має найвищу ефективність очищення.

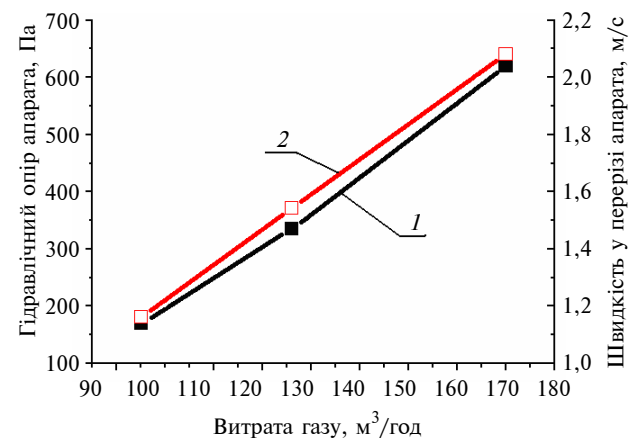


Рис. 7. Залежність перепаду тиску і зміни швидкості в перерізі апарата від зміни витрати очищуваного газу в циклофільтрі: 1 – зміна тиску; 2 – зміна швидкості

На рис. 7. наведено залежність перепаду тиску і зміни швидкості в перерізі апарата від зміни витрати очищуваного газу в циклофільтрі.

З рис. 7 видно, що зі збільшенням швидкості потоку на вході в циклофільтр, а отже, і витрати газу, зростає перепад тиску (аеродинамічний опір циклофільтра). Узагальнюючи наведені на рис. 6 і 7 графіки, можна зробити висновок про існування в циклофільтрі оптимальної швидкості в перерізі апарата, рівної 1,22 м/с, при якій досягається максимальне вилучення – 96,4 % – золи з медіанним діаметром 35 мкм. Збільшення швидкості по перерізу циклофільтра призводить до істотного віднесення золи. Так, збільшення швидкості в 1,8 разу збільшує віднесення золи в 2 рази. Отримані експериментальні дані слід враховувати при проектуванні циклофільтрів для очищення запиленних повітряних або газових потоків.

Висновки

Наукова та практична цінність результатів, отриманих при проведенні стендових випробу-

вань відцентрового фільтра і циклофільтра та розрахунково-порівняльного аналізу цих апаратів з типовими циклонами НДІОГАЗ, полягає в тому, що при проектуванні систем газоочистки, залежно від конкретних технічних умов, може бути запропонований варіант очищення від золи в циклофільтрі з аеродинамічним опором 170 Па при коефіцієнті віднесення 3,6 % або у відцентровому фільтрі з аеродинамічним опором 860 Па при коефіцієнті віднесення 1,5 %. Так, реальна забрудненість димових газів від котлів ЧТЕС становить 1500 мг/м³, тобто ступінь вловлювання відцентрового фільтра дає можливість досягти жорстких вимог директиви ЄС 2001/80/ЄС та кінцевої загороженості на рівні 25 мг/м³.

Зниження коефіцієнта віднесення твердих частинок з циклофільтра можливе при використанні в ньому фільтр-патрона.

У подальшому планується вивчення роботи циклофільтра з використанням у ньому фільтр-патрона. Ці дослідження будуть продовжені в лабораторії Інституту технічної теплофізики НАН України.

1. *Серебрянский Д.А.* Двухступенчатая очистка газов от прокалочной печи кокса в центробежных фильтрах // Экология и промышленность. – 2010. – № 4. – С. 18–20.
2. Заявка на патент України № а 2011 03388.
3. *Коузов П.А.* Сравнительная оценка эффективности циклонов различных типов // Научн. труды институтов охраны труда ВЦСПС. – 1969. – Вып. 60. – С. 3–13.
4. *Коузов П.А.* Сравнительная оценка циклонов различных типов // Обеспыливание в металлургии. – М.: Металлургия, 1971. – С. 185–196.
5. *Скрябина Л.А.* Атлас промышленных пылей: Обзор, информ. – М.: ГИХИНЕФТЕМАШ, 1980. – 17 с.
6. *Справочник по пыле- и золоулавливанию* / Под ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. *Приемов С.И.* Метод расчета циклонных пылеуловителей // Пром. теплотехника. – 1996. – № 4. – С. 49–52.
8. *Вальдберг А.Ю., Кирсанова Н.С.* К расчету эффективности циклонных пылеуловителей // Теор. основы хим. технологии. – 1989. – 23, № 4. – С. 555–556.
9. *Вальдберг А.Ю., Кирсанова Н.С.* Практическая реализация вероятностно-энергетического метода расчета центробежных пылеуловителей // Хим. и нефтяное машиностроение. – 1994. – № 9. – С. 26–27.

Рекомендована Радою
хіміко-технологічного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
8 квітня 2011 року