

ОЧИЩЕННЯ ГАЗО-АЕРОЗОЛЬНИХ ВИКИДІВ АЕС (Частина 2) *

Левченко О. Г., д.т.н., проф., зав. каф. ОППЦБ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Анотація. Виконано аналіз методів та систем очищення повітря від радіоактивних газо-аерозольних викидів атомних електричних станцій. Наведено опис і характеристики основних видів фільтрів і матеріалів для очищення повітря від викидів атомних електростанцій.

Ключові слова: АЕС, газоподібні радіоактивні викиди, аерозолі, гази, системи очищення, фільтруючі матеріали.

Abstract. The analysis of methods and systems of air purification from radioactive gas-aerosol emissions of nuclear power plants was performed. The description and characteristics of the main types of filters and materials for air purification from emissions of nuclear power plants are given.

Keywords: Nuclear power plants, gaseous radioactive emissions, aerosols, gases, cleaning systems, filter materials.

Для очищення повітря від газо-аерозольних викидів атомних електричних станцій найбільше застосування знайшли такі види фільтрів [1, 2]: металотканинні МТФ; металокерамічні МКФ; набивні; тканинні (опис цих фільтрів наведено в першій частині статті); фільтри Петрянова; скловолокно; електрофільтри; ядерні фільтри.

Фільтри І.В. Петрянова (ФП). У нашій країні практично всі системи тонкої фільтрації, у тому числі і на АЕС, побудована на фільтруючому матеріалі ФП [3]. Він складається із шарів електростатично заряджених волокон, нанесених на підкладку з марлі або нетканого матеріалу. Ці матеріали мають унікальні властивості – можуть бути хімічно та термічно стійкими залежно від вихідних полімерів. Із перхлорвінілу і фторполімерів отримують фільтруючі матеріали стійкі до сильних кислот і лугів, з поліакрилонітрилу – стійкі до багатьох органічних розчинників, поліарилату і поліарилід – стійкі до температур 400 °С, із політрифторстиролу і полісульфону – стійкі до паростерилізації. Залежно від призначення структура волокнистого шару може бути пухкою або щільною.

Ці фільтри знайшли досить широке застосування для очищення тонкодисперсних аерозолів. Вони застосовуються для очищення повітря і газів не тільки від радіоактивних аерозолів, але й від будь-яких тонкодисперсних частинок розміром 1 мкм і менше.

У даний час практично ні одне підприємство, яке має справу з радіоактивними речовинами, не обходиться без застосування фільтрів Петрянова. Особливо, широке застосування в фільтрах знайшли тканини марок ФПП і ФПА. Тканина марки ФПП складається з ультратонких (дуже тонких) волокон перхлорвінілу, нанесених на марлеву або бязеву підложку. Ультратонкі волокна перхлорвінілу не змочуються водою, стійкі до кислот і лугів. Експлуатуються при температурі до 60 °С. Середній діаметр волокон ФПП 1,5 та

2,5 мкм [3].

У залежності від діаметра волокна тканина відповідно маркується: при діаметрі волокна 1,5 мкм – ФПП-15, при діаметрі волокна 2,5 мкм – ФПП-25. Тканини ФПП не стійкі до масел і органічних розчинників. Промисловістю освоєно способи отримання фільтруючих матеріалів з великою різноманітністю властивостей: для різних речовин, діаметрів волокон, товщини шарів і щільності упаковок. Проте переважно випускається матеріал типу ФПП-15–1,5 із середнім діаметром волокна 1,5–1,7 мкм та з аеродинамічним опором 1,5 мм вод. ст. при швидкості газового потоку 1 см/с. Тканина марки ФПА складається з ультратонких волокон ацетил-целюлози. Діаметр волокон тканини ФПА становить 1,5 мкм. Тканини ФПА стійкі до речовин органічного рослинного походження [3].

Робоча температура, за якої волокнисті фільтруючі матеріали ФП зберігають працездатність, доходить до 65 °С. На АЕС частина газових викидів має більш високу температуру, що призводить до необхідності установки калориферів перед фільтрами. До недоліків фільтруючих матеріалів на основі синтетичних волокон слід віднести їх розчинність або набухання в маслах, пластифікаторах, парах багатьох розчинників.

Промисловістю випускаються різні марки рамочних фільтрів, наприклад Д-6, Д-9, Д-15, Д-23 Д-26 Д-33 та ін. Тут цифри після індексу вказують площу поверхні фільтруючого матеріалу в квадратних метрах. Фільтри типу Д-кл, Д-збирають із П-подібних дерев'яних або цільноштампованих гофрованих рамок-сепараторів із вініпластової плівки клиновидної або прямокутної форми, між якими укладається фільтруючий матеріал.

Клиновидні сепаратори побудовані таким чином, що висота вхідних каналів збільшується зі зменшенням кількості повітря, що проходить через них, а висота вихідного повітря зі збільшенням кількості повітря підвищується. Фільтри такого типу оснащені фільтруючим матеріалом ФПП-15 із перхлорвінілу з волокнами діаметром 1,3–1,4 мкм і стандартним опором 30–45 Па (3,0–4,5 мм вод. ст.). На відміну від однакових за габаритами фільтрів з прямими рамками-сепараторами, фільтруюча поверхня фільтрів з клиновидними сепараторами більша на 25–30%. При порівняно невеликих габаритах ці фільтри мають високу продуктивність. Наприклад, фільтр Д-33кл розміром 0,5903×0,636×0,750 м (об'єм 0,282 м³) може очищати приблизно 5000 м³/год повітря. Аерозольні фільтри Д-23кл встановлюються на АЕС у спеціальній комірці. Фільтри розміщені нижче рівня полу під шаром бетонного захисту. Декілька фільтрів, поставлених один на одній, встановлюють проти отворів, до яких фільтри щільно притискають спеціальні прижими. Дані фільтрувальні системи вимагають дуже якісного монтажу і ретельної установки фільтрів для забезпечення герметичності тиску і досягнення високої ефективності фільтрації. Корпуси цих фільтрів виконані із фанери і оснащені спеціальними відкидними ручками.

Фільтри Д-23кл через обмежену термостійкості фільтруючого матеріалу ФП і вініпластових сепараторів застосовуються при температурі не вище 60 °С.

Фільтри Петрянова використовуються для очищення газу (повітря) від тонкодисперсних аерозолів і, зазвичай, у системах пило-газоочищення, вони встановлюються після фільтрів грубої очистки. Нормально вони працюють, коли в очищуваному повітрі загальна масова концентрація частинок не перевищує $0,2-0,5 \text{ мг/м}^3$. Коефіцієнт очищення фільтрів на основі тканини Петрянова досягає 99,99%. Практика експлуатації фільтрів Петрянова показує, що максимальне накопичення пилу на фільтрі не повинно перевищувати $50-100 \text{ г/м}^2$, після чого їх необхідно замінити [3].

У процесі виробництва матеріал сильно заряджається, його показник фільтрації для частинок розміром $0,3 \text{ мкм}$ становить $1,2-1,5$. Проте в умовах високої вологості, під дією іонізуючого вилучення і при накопиченні електропровідного пилу заряди стікають з матеріалу ФП і значення цього показника зменшується до $0,6$. Більш того, показник фільтрації падає і при очищенні повітря в звичайних умовах. Так, в експериментах під час уловлювання матеріалом ФП-15-1,5 модельних частинок стеаринової кислоти радіусом $0,16 \text{ мкм}$ і концентрацією $2,8 \cdot 10^6 \text{ част./см}^3$ при швидкості фільтрації $1,8 \text{ см/с}$ початкова ефективність уловлювання часток складала $99,93\%$ при стандартному опорі 13 Па ($1,3 \text{ мм вод. ст.}$), тобто, показник фільтрації становив $2,3$. Після роботи протягом 2 годин опір фільтра в результаті поступового накопичення уловлених частинок збільшувався до 20 Па (2 мм вод. ст.), а ефективність падала до $96,4\%$. Таким чином, показник фільтрації становив $0,72$.

У другому експерименті при пропусканні чистого азоту через подвійний шар матеріалу ФП-15-1,5 протягом 2 годин зі швидкістю $5,5 \text{ см/с}$ показник фільтрації зменшувався з $1,15$ до $0,77$. Таке падіння ефективності, ймовірно, можна пояснити зниженням дії електричних сил, оскільки приблизно таке ж падіння ефективності спостерігається при опроміненні фільтруючого матеріалу іонізуючим випромінюванням.

Фільтри грубого і тонкого очищення при невеликих об'ємах очищуваного повітря можуть бути розміщені в одному корпусі. До числа комбінованих (двоступеневих) фільтрів відносяться фільтри марок ДК-0,11; ДК-0,24; ДК-0,6; ДК-1,4; ДК-4,5. Роль фільтра грубого очищення (1-й ступінь) виконує лавсанова тканина зі щільністю укладки лавсанового волокна 15 кг/м^3 , а фільтр тонкого очищення (2-й ступінь) – тканину Петрянова. Випускаються фільтри різної продуктивності.

Скловолокно. Натепер у всіх розвинених країнах процеси тонкої фільтрації ґрунтуються не на синтетичних матеріалах, а на матеріалах з ультратонкого скловолокна. Вони вигідно відрізняються тим, що на них практично не діють волога, кислоти, розчинники, щілини, температура до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ (в деяких випадках до $800 \text{ }^\circ\text{C}$). Фільтруючі матеріали руйнуються під дією плавикової кислоти і киплячих концентрованих лугів, чого на АЭС не зустрічається [3].

Скловолокнистий матеріал не горючий, має високу ефективністю і радіаційну стійкість. Коефіцієнт фільтруючої дії таких матеріалів залежить від товщини волокна, у кращих зразках він досягає $0,7$ і не залежить від умов

зберігання та експлуатації в широкому діапазоні параметрів фільтруючої середовища. За кордоном на АЕС застосовуються переважно скловолокнисті аерозольні фільтри. За діючим в США стандартом ефективність НЕРА [4] – фільтрів (High Efficiency Particulate Air Filter), що застосовуються для тонкого очищення повітря на АЕС, повинна становити не менше 99,97% при швидкості фільтрації 5 см/с і розмірі частинок 0,3 мкм, а максимальний опір чистого фільтра не повинен перевищувати 250 Па. Показник фільтрації скловолокнистих НЕРА – фільтрів вище 0,75.

У залежності від умов роботи НЕРА – фільтри їх сепараторів виготовляють із азбесту, алюмінієвої фольги, пластмаси або нержавіючої сталі, а корпус – із дерева, вуглеродистої або нержавіючої сталі. Вогнестійкі і термостійкі фільтри витримують протягом 5–10 хв температуру до 400 °С [4].

Ще один тип фільтруючого матеріалу, на основі якого розробляються аерозольні фільтри для рециркуляційних вентиляційних систем АЕС, виготовлені зі скловолокна. Їх виготовляють методом дуття розплаву скла через платинові фільтри. При цьому товщина одержуваних волокон залежить від режиму продувки. Якщо виготовлення фільтрів будь-якої товщини використовують одну форсунку і режим роботи не змінюють, то матеріал отримується з більш або менш рівними волокнами.

Наша промисловість виробляє скловолокно товщиною в кілька сантиметрів, радіус волокна в яких становить від кількох десятків до кількох десятків мікрон. На основі цих матеріалів виготовляють фільтри типів ПФТС, ФА, ФАРТОС [5]. У тих вентиляційних системах, де можливо підвищення температури очищуваного повітря вище 60 °С і виникнення пароводяної суміші, застосовують самоочищувальні фільтри типу ФАРТОС, які призначені для очищення повітря від особливо агресивних аерозолів, що містять хімічно агресивні тумани. Фільтри цього типу виконані на основі фільтруючого матеріалу із ультратонкого скловолокна. Середній діаметр волокон 0,8 мкм.

Фільтри ФАРТОС мають високу ефективністю очищення, здатні працювати в режимі самоочищення. Їх недоліком є низька продуктивність (до 2500 м³/год) при порівняно більших габаритах. Крім того, для виготовлення корпусу фільтра необхідна дефіцитна нержавіюча сталь. Проте матеріали зі скловолокна не призначені спеціально для фільтрації аерозолів, тому при їх виготовленні волокна не розподіляються рівномірно. Навіть найкращі з цих матеріалів, наприклад, М20-УТВ, незважаючи на значну товщину, мають порівняно невисоку ефективність очищення частинок (показник фільтрації 0,3–0,4). Велика товщина матеріалу забезпечує виготовлення фільтрів з розвиненою фільтруючою поверхнею, хоча і забезпечує його високу пилоємність [5].

Відомі фільтруючі матеріали кількох типів: ФСВ-А з волокнами діаметром 0,5 мкм; ФСВ-У з волокнами діаметром 0,18 мкм; ФСВ-П з волокнами діаметром приблизно 0,8 мкм. Матеріал типу ФСВ-П [6] був основою для виготовлення та випробування аерозольних високотемпературних фільтрів для очищення вентиляційного повітря АЕС. Із порівняння наведених характеристик різних

фільтруючих матеріалів більш видно, що для АЕС придатними за жаростійкістю та стійкістю до вологи та органічних розчинників є високоефективні фільтруючі матеріали .

Переважно випускають матеріал із середнім діаметром волокна близько 2 мкм товщиною 50–60 мм. Для фільтрації в умовах АЕС цей матеріал уловлює близько 85% радіоактивних аерозолів при перепаді тиску приблизно 50 мм вод. ст. і швидкості фільтрації 20 см/с. Скловолокнистий матеріал М20-УТВ/0,85-65 має середній діаметр волокон $0,85 \pm \pm 0,15$ мкм, нерівномірність розподілу волокон по площі фільтра не перевищує 15%. Щільність матеріалу становить близько 65 г/м^2 [7].

Фільтруючий матеріал із виробленого скловолокнистого матеріалу товщиною 10–11 мм отримують шляхом обжаття кількома повітряними струменями, змоченими водою, з наступним висушуванням гарячим повітрям. У результаті щільність матеріалу збільшується до 600 г/м^2 , підвищується ефективність уловлювання аерозольних частинок при незначному підвищенні опору і зниженні пилоємності.

Аерозольні фільтри на зарубіжних АЕС зазвичай входять до складу комплексних фільтрувальних вентиляційних установок. У склад установки входять: камера з фільтрами для уловлювання водяного туману і крапель; електричний повітрянагрівач для підтримки вологи очищається повітря в межах, необхідних для нормальної роботи вугільних фільтрів; камера з аерозольними фільтрами попередньої очистки; камера з високоефективними аерозольними фільтрами; камера з вугільними фільтрами [8].

Конструкція установки дозволяє виробляти швидку заміну фільтрів при забезпеченні герметичності з'єднань. Середня тривалість демонтажу одного фільтра при двох працівниках становить близько 2 хвилини. Для зручності обслуговування камери фільтрів прикріплені герметичні дверцята. Маса аерозольних фільтрів при стандартних габаритах $0,10 \times 0,610 \times 0,292$ м становить приблизно 16 кг. Номінальна витрата повітря через один фільтр – $1700 \text{ м}^3/\text{год}$, при цьому перепад тиску на чистому фільтрі не перевищує 250 Па. Скловолокнистий фільтруючий матеріал у вигляді паперу товщиною 0,7 мм і поверхневою щільністю приблизно 90 г/м^2 , оброблений спеціальною силіконовою обробкою для підвищення водостійкості та надання еластичності. Крім високих фільтраційних і гідрофобних властивостей, він також має термостійкість (до $200 \text{ }^\circ\text{C}$), міцність і технологічний при збиранні фільтрів [8]. На жаль, в Україні ще не налагоджений промисловий випуск скловолокнистого фільтруючого високоефективного матеріалу, здатного працювати при високих температурах і вологості, над чим ще слід попрацювати.

Література

1. Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 – 2006 гг. – Чернобыль, 2008. – 456 с.

2. Левченко О. Г. Очищення газо-аерозольних викидів АЕС (Частина 1) // Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки: Зб. мат. двадцять шостої Всеукраїнської наук.-метод. конф. (17 листопада 2022 р., м. Київ). – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 96-100. <http://confopcb.iee.kpi.ua/proc/issue/view/15496>.

3. Волокнистые фильтрующие материалы ФП / И.В. Петрянов, В.И. Козлов, П.И. Басманов, Б.И. Огородников. – М.: Об-во «Знание», 1968. – 80 с.

4. Фільтри для атомної енергетики. <https://selton.com.ua/produkcziya/filtry-dlya-atomnoj-energetiki/>.

5. Фильтры аерозольні сейсмостійкі ФАС (аналог ФАРТОС). <https://zapadpribor.com/filtry-aerazolnye-seysmostoykie-fas-analog-fartos/>.

6. Фільтри очищення газів ФСВ-П, ФСВ-О, ФСВ-Т. <https://kms-market.com.ua/ua/p107377496-filtry-ochistki-gazov.html>.

7. Петрянов-Соколов И.В., Сугутин А.Г. Аэрозоли. – М.: Наука, 1989. – 144 с.

8. Аэрозоли объекта «Укрытие» (обзор). Часть 2.2. Концентрации радиоактивных аэрозолей на промплощадке объекта «Укрытие». –Чернобыль, 2004. – 44 с. – (Препр. / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; 04-1).

* Стаття продовжує серію публікацій про проблеми радіаційної безпеки, розпочату в попередніх збірниках конференцій