

УДК 504.3.054:621.039.5

О.І. Бондар

д.б.н.

Н.Ю. Голубцова

аспірант

Ю.С. Лапшин

д.т.н.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
Рецензент – член редколегії «Вісник ЖНАЕУ», д.т.н. І.Г. Грабар

ТЕХНОЛОГІЯ ВИЛУЧЕННЯ ПАЛИВОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ АВАРІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Для технології вилучення радіоактивних матеріалів з аварійних приміщень ядерної енергетики із застосуванням пневмотранспорту запропоновано спосіб, за допомогою якого можна очистити відпрацьоване (транспортуюче) повітря до необхідного рівня. Спосіб заснований на застосуванні барботажних камер. Стаття містить математичну модель процесу очищення.

Постановка проблеми

Вилучення паливовмісних матеріалів (ПВМ) із аварійних ядерних об'єктів завжди пов'язане зі значними дозовитратами. Особливо великі складнощі виникають у зв'язку з необхідністю дезактивації об'єкта «Укриття». Безпечної технології досі не існує. Тому перша спроба теоретичного обґрунтування нової технології, а цьому питанню й присвячена ця стаття, є доцільною.

Вперше пропонується теоретичний метод дослідження дієздатності нової технології, розробленої ініціативною групою співробітників Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління й «СП Ланко». Ця технологія вилучення здатна звести величину дозовитрат до мінімуму.

Метою цієї роботи є визначення оптимальних параметрів запропонованої системи вилучення ПВМ теоретичним шляхом.

Технологію засновано на використанні спеціального пневматичного маніпулятора (пиловсмоктувача), обладнаного дистанційною електромеханічною системою керування, системою контролю активності, що вилучається, а також системою очищення й дезактивації матеріалу, що вилучається. Технологію можна використовувати для вилучення ПВМ із об'єкта «Укриття четвертого енергоблока ЧАЕС». Необхідність виконання цієї роботи відома [1].

У цій роботі розглянуто питання вилучення із пневмотранспортного колектора й дезактивації часток, що мають радіоактивні включення. Запропоновано шлях вирішення цього завдання за допомогою системи

барботажних камер. Ця система вловлює й дезактивує тільки дрібнодисперсні фракції. Передбачається, що більші фракції осіли у відстійнику та вилучені із транспортного потоку фільтрами, що розташовані вище, центрифугуванням, магнітними пастками, електростатичними уловлювачами. Метою цієї роботи є також ознайомлення із принципом роботи комп'ютерної програми, створеної для знаходження оптимальних параметрів системи барботажних камер.

Конструктивні особливості запропонованої системи очищення. Система складається з декількох барботажних камер, які послідовно приєднані до однієї з галузок пневмотранспортного колектора. До другої галузки цього колектора барботажні камери підключені паралельно. Засувки, керування якими здійснюється з дистанційного пульта, дають змогу операторові або автоматизованій комп'ютерній системі керування виключати з роботи будь-яку барботажну камеру або групу камер (рис. 1). Технологія передбачає епізодичне перекачування робочої рідини (розчину) з розташованої нижче за потоком барботажної камери в камеру, розташовану вище. Це перекачування здійснюється трубопроводом, що з'єднує дві сусідні барботажні камери. Кожен трубопровід має керувану з дистанційного пульта засувку.

Барботажна камера являє собою герметичну ємність, частково заповнену робочою рідиною. На деякій висоті над дном барботажної камери встановлюють ґрати, виконані з перфорованих труб. Бажано, щоб ґрати були встановлені строго горизонтально. Вони на деяку глибину занурені в робочу рідину. До ґрат жорстко приєднано вібратор, що забезпечує їх вібрацію у значному діапазоні амплітуд і частот. Усередині барботажної камери може знаходитися ширма-перегородка, призначена для впорядкування руху спливаючих у робочій рідині пухирців повітря, що надходять із ґрат. Із приямка в дні барботажної камери, іменованого далі піддоном, відходить патрубок, що з'єднує барботажну камеру із пристроєм, призначеним для видобування твердих відкладень, що накопичуються в піддоні, який періодично включається. Робоча рідина, що пройшла очищення, повертається в барботажну камеру по зворотному патрубку. Отриманий у результаті очищення концентрат піддають обробці з метою підготовки його для захоронення або вводять у розташовану нижче барботажну камеру для його подальшого очищення.

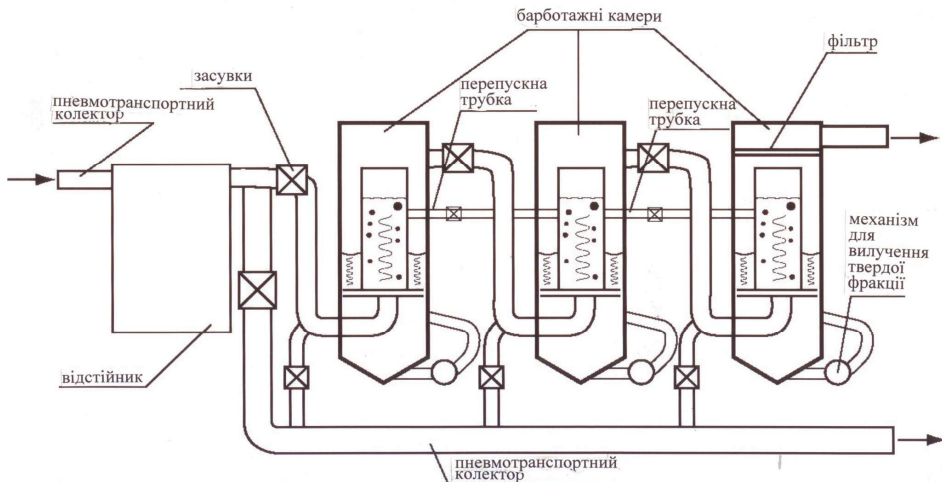


Рис 1.

Механізм керування системою очищення, що має пульт керування, складається з мережі контролю, яка в режимі реального часу вимірює витрати активності, що проходить пневмотранспортним колектором, і кількість транспортованого матеріалу. Пульт керування обладнаний комп'ютером із програмою управління роботою системи. Всі виконавчі механізми з керування системою очищення (вібратори, засувки, пристрій для вилучення твердих відкладень) пов'язані з пультом керування кабельною мережею.

Принцип роботи системи барботажних камер. У робочому режимі в грати барботажної камери з пневмотранспортного колектора надходить забруднене повітря, що виходить через перфорацію ґрат. Повітря у вигляді дрібних (каліброваних) пухирців спливає в робочій рідині, передаючи їй частину забруднень, що утримуються в ньому.

Примітка: розмір пухирців залежить від частоти й амплітуди вібратора, що коливає ґрати в горизонтальній площині, і діаметра перфораційних отворів.

На початку процесу очищення барботажні камери підключено послідовно. Тому у розташованих вище в транспортному потоці камерах накопичується більше активності.

Практично вся енергія, що витрачається на транспортування забрудненого повітря через систему очищення, переходить у тепло, одержуване робочою рідиною камер. До нього додається теплова енергія активності (залишкове тепловиділення), що накопичується в робочій рідині. За належної теплової ізоляції барботажних камер вся ця теплова енергія витратиться на випаровування робочої рідини, що підвищуватиме її концентрацію активності. При підвищенні концентрації до стану, близького до кристалізації (або

критичності), робоча рідина з першої барботажної камери вилучається для підготовки до захоронення в штатному режимі. Після цього робоча рідина з розташованих нижче камер перекачується у розташовані вище, а в останню камеру заливається свіжа робоча рідина. Можливий і інший варіант: після досягнення граничного насичення першу барботажну камеру консервують, тобто переводять у розряд контейнерів тимчасового зберігання. Друга барботажна камера бере на себе обов'язки виключеної (першої) камери, а наприкінці ланцюжка барботажних камер уводять в дію нову барботажну камеру і т. д.

Принципові основи визначення оптимальних параметрів системи очищення. Оптимальними параметрами системи очищення вважатимемо такі, за яких заданий ступінь очищення повітря досягається при мінімумі економічних витрат. При цьому до економічного показника мають бути включені всі види витрат, зокрема й дозовитрати. У цій статті буде показано шлях визначення оптимальних конструктивних параметрів, виходячи з мінімізації енерговитрат і витрат на капітальне будівництво.

Постановка задачі

Потрібно визначити потужність, споживану системою барботажних камер, і площу поперечного (горизонтального) перетину стакана-обмежувача, за яких досягається заданий ступінь очищення з умови мінімізації сумарних витрат на оренду й обслуговування системи барботажних камер за одиницю часу.

Прийняті припущення й вихідні передумови:

- коефіцієнт корисної дії вібратора, що забезпечує необхідний розмір пухирця, – 0,01;
- робоча рідина – вода;
- розрахункова ціна електроенергії – 1 грн. за кВт/год.;
- орендна вартість одного квадратного метра барботажної камери – 1000 грн./добу;
- середня розрахункова температура усередині барботажної камери – 50 °С. при цьому динамічний коефіцієнт в'язкості робочої рідини – $0,000055 \text{ кг} \times \text{с} / \text{м}^2$ [2];
- повітря має властивості ідеального газу;
- розхід повітря – $1 \text{ м}^3 / \text{с}$ за нормальних умов.

Прийняті припущення.

Процентний вміст сумарного обсягу пухирців повітря в стакані першої барботажної камери вище ґрат – 20 % (визначається параметрами перфорації ґрат і підтримується відповідним режимом роботи вібратора).

Частки, що вловлюються, малі, але все ж таки досить великі, порівняно з молекулами повітря. Їхній коефіцієнт дифузії в повітрі в 34500 разів менший за коефіцієнт дифузії молекул азоту повітря, тобто при атмосферному тиску й температурі 50 °С він становитиме $0,000058 \text{ см}^2 / \text{с}$.

Поверхня всіх часток, що вловлюються, добре змочується робочою рідиною (ефект прилипання часток до робочої рідини).

Правомірність двох останніх припущень може викликати сумніви. Дійсно, автори поки не дають оцінки похибці, викликаній цими припущеннями, а обмежуються загальними міркуваннями про те, що, якщо коефіцієнт дифузії виявиться значно меншим від прийнятого в розрахунку, то це не змінить висновок про працездатність запропонованої технології очищення. У цьому випадку оптимальні параметри будуть іншими, а вартість очищення трохи зросте. При більшому значенні реального коефіцієнта дифузії (а це досить імовірно, оскільки усередині пухирця при його спливанні повинна ще проявлятися турбулентність, викликана вібрацією) витрати на очищення виявляться меншими. Друге припущення менш обґрунтоване. Насправді всі речовини з питомою вагою, меншою за питому вагу води, виходять за межі цього припущення. Більше того, гарячі частки з важким ядром вкриті плівкою, утвореною легкими молекулами й атомами. Отже друге припущення не обґрунтоване. Розуміючи це, автори вважають, що питання можна вирішити технічними засобами. Наприклад, у технологічній ланцюг очищення (між двома сусідніми барботажними камерами) включити камеру випалу транспортуючого повітря й суспензій, що містяться в цьому повітрі. Такий прийом забезпечить змочування. Можливо також в останній барботажній камері використовувати менш важку рідину, наприклад, олію замість води.

Прийняті позначення:

Q – витрати повітря;

q – питома витрата повітря;

H – перевищення рівня робочої рідини над рівнем ґрат;

a – коефіцієнт поверхневого натягу;

v – динамічна в'язкість робочої рідини;

h – висота стакана-обмежувача;

S – площа горизонтального перетину стакана-обмежувача барботажної камери;

r – радіус пухирця, спливаючого в барботажній камері;

V – швидкість підйому (спливання) пухирця повітря;

γ – щільність робочої рідини;

D – коефіцієнт дифузії забруднювача в повітрі;

O – ступінь очищення (відношення концентрації забруднювача повітря, що виходить із системи очищення, до концентрації на вході в систему);

T – концентрація забруднень на вході в барботажну камеру;

t – концентрація забруднень у спливаючому пухирці (функція відстані від центру пухирця й часу);

t – час;

F – сума експлуатаційних витрат і плати за оренду системи барботажних камер, віднесених до од. часу;

P – робочий (надлишковий) тиск на вході в барботажну систему;

W – потужність, споживана барботажною системою.

Отже, потрібно відшукати мінімум функції F , що залежить від змінних P, H, d , і значення заданого параметра O .

Для розв'язання цієї задачі розроблено комп'ютерну програму, що визначає значення функції F на підставі фіксованих значень параметрів, а мінімум функції F знаходить за допомогою методу найшвидшого спуску.

Хід роботи цієї програми ілюструє наступний приклад.

Нехай: $O = 0,0001$, $P = 5$ атм.; $H = 0,5$ м; $r = 0,121$ мм.

За цих умов $h = 62,5$ см.

За формулою Стокса [3]:

$$\gamma \times 4/3 \times \rho \times r^3 = 6 \times \rho \times r \times v \times V. \quad (1)$$

Тобто $V = 0,0476$ м/с.

Таким чином, процес спливання кожного пухирця повітря в першій барботажній камері буде тривати 13,13 с. У нашому випадку питомі витрати повітря можна визначити приблизно за умови, що об'ємний вміст пухирців становить 20 % у склянці барботажної камери і зневаги втратами енергії на вході в барботажну камеру. У цьому випадку питомий розхід повітря становитиме:

$$q = 0,2 \times V \times P = 0,2 \times 0,0476 \times 5 = 0,0476 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

У результаті $S = 21 \text{ м}^2$.

Для визначення швидкості виходу забруднень із пухирця (перехід забруднень у робочу рідину) потрібно розв'язати просторову нестационарну крайову задачу для рівняння дифузії. Задача спрощується тим, що має місце випадок сферичної симетрії. Для кулі (а саме таким тілом практично і є пухирець малих розмірів у рідині) отримано наступний точний розв'язок [4]:

$$m / T = \sum_{n=1}^{\infty} [6 / \mu]^n \exp(-\mu^n \phi). \quad (3)$$

де $\mu = n^2 \pi^2$, а $\Phi = D \cdot t / r^2$.

При $t = 13,13$ с, $D = 0,0000058 \text{ см}^2/\text{с}$, $r = 0,121$ мм маємо:

$$\Phi = 0,0000058 \times 13,13 / 0,000145 = 0,5252. \quad (4)$$

Отже:

$$m / T = 0,0035.$$

Тобто, у нашому випадку середня концентрація в пухирці в 285 разів менша за початкову концентрацію, але у 35 разів вища за потрібну. Очевидно, що друга барботажна камера необхідна й достатня. Достатня, тому що вона почне процес очищення після осереднення концентрації за об'ємом кожного свого пухирця й

цю концентрацію, у свою чергу, понизить майже в 400 разів. Тобто даний варіант далеко не оптимальний. Підрахуємо денні витрати. Вони складаються з:

– орендної плати – 42 тис. грн.;

– оплати енерговитрат на подачу повітря в систему барботажних камер – $86400000 \times 25 \text{ кгм} / 0,5 = 4320000000 \text{ кгм}$, де 0,5 – КПД компресора, тобто $4320 \times 2,724 = 11768 \text{ грн}$;

– оплати енерговитрат на роботу вібратора, що працює проти сил поверхневого натягу під час утворення пухирців. Передбачається, що вся робота проти сил поверхневого натягу пухирців виконується вібратором, КПД якого 0,01. Оскільки все повітря об'ємом $(86400 \text{ м}^3)/5 = 17280 \text{ м}^3$ двічі проходить фазу перетворення в пухирці діаметром 0,242 мм, то при питомій енергії поверхневої плівки води $67,79 \text{ ерг/см}^2$ загальні витрати енергії на утворення пухирців становитимуть 65 кВт/год.

Сумарні витрати становлять $F = 53833 \text{ грн./добу}$.

Комп'ютерна програма, що виконує пошук за методом градієнтного спускання, відшукає варіант, за якого витрати виявляться майже у 2,5 раза меншими.

Таким чином досягнута мета дослідження. Теоретично доведено, що барботажна система очищення повітря, яке транспортує радіоактивні аерозолі, буде виконувати свою функцію при мінімальних ресурсних і дозовитратах.

Висновки

1. Виконані дослідження переконують, що барботажні камери можуть бути прийняті як альтернатива нині діючій на об'єкті «Укриття» системі пілеподавлення, оскільки вони (при їхній роботі в режимі керування з дистанційного пульта) дають змогу не тільки створити безпечне утримання об'єкта, але й виконувати вилучення ПВМ при малих дозовитратах.

2. Необхідно провести додаткові дослідження, (бажано експериментальні) щодо уточнення коефіцієнта дифузії й когезійних властивостей дрібнодисперсної складової ПВМ.

Література

-
1. *Латшин Ю.С.* Серьезные проблемы объекта «Укрытие» / *Ю.С. Латшин, Н.Ю. Голубцова* Винахідник і раціоналізатор. – 2008. – № 7. – С. 16–19.
 2. *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. / *И.К. Кикоин*. М.: Атомиздат
 3. *Ландау А.Д.* Механика сплошных сред. / *А.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц*. – М. : Техн.-теорет. Лит., 1953. – 87 стр.
 4. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности / *А.В. Лыков* – М. : Высшая школа, – 1967. – 105 с.
-