

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПИЛООЧИЩЕННЯ ГАЗІВ В СКРУБЕРАХ ВЕНТУРІ

Київський національний університет будівництва та архітектури, Україна

Описано математичну модель гідродинамічних та мосообмінних елементарних процесів-подій при пиловловленні у скруберах Вентурі. Ці події об'єднані у загальну формулу ефективності очищення газів від пилу, отриману у відповідності із блок-схемою, розробленою на основі ймовірнісного методу моделювання.

Постановка проблеми. Виконавши аналіз раніше описаних різноманітних процесів пиловловлення та їх ймовірнісні моделі [1], було вперше розроблено блок схему очищення газів від пилу в скруберах Вентурі, в якій загальний процес поділено на елементарні події.

Для отримання за цією схемою математичної моделі процесу очищення газів необхідно кожен елементарну ймовірнісну подію, що відбувається в апаратах системи «труба Вентурі–скрубер», виразити в математичній формі через фізичні закономірності [1–3]. Суть методу складається у попередньому розчленуванні досліджуваного процесу на окремі порівняно прості стадії (події), які описуються декількома одночасно та по-різному діючими залежними та незалежними між собою силами. Кожна подія розкривається за допомогою відомих або спеціально розроблених математичних формул через параметри, що впливають на ефективність процесу. Окремі події об'єднуються між собою за законами ймовірностей, у результаті чого виходить ймовірнісна блок-схема інтерпретації процесу в цілому (рис. 1).

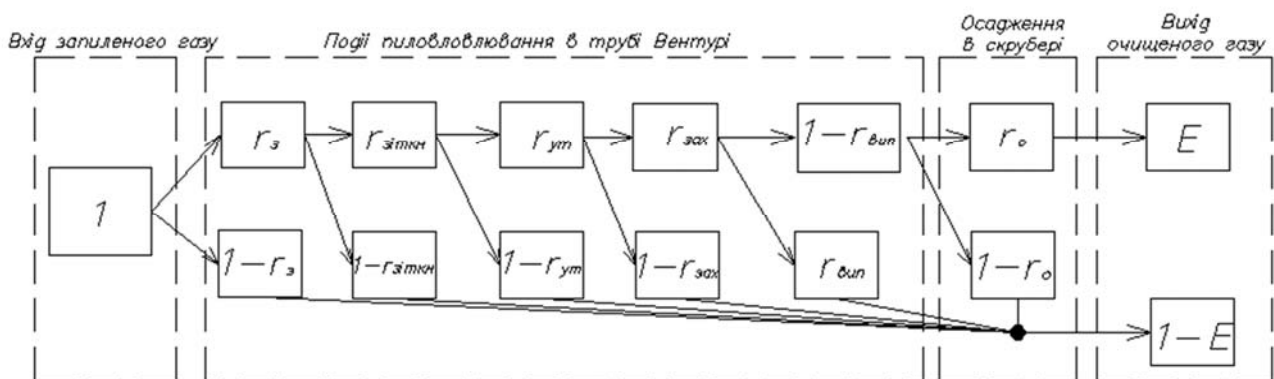


Рис. 1. Ймовірнісна блок-схема опису процесу пиловловлення в скрубєрі Вентурі

Після підстановки окремих ймовірностей у загальну формулу ефективності виходить шукана математична модель. Використання ймовірнісного методу спрощує математичну інтерпретацію складних процесів, дозволяє одночасно врахувати паралельний та послідовний вплив

різноманітних факторів на ефективність пиловловлення в скруберах Вентурі та полегшує оптимізацію процесу.

Постановка задачі. Очищення газу від пилу в скруберах Вентурі представлено у вигляді масообмінного процесу між краплями води та запиленним газовим потоком, що розділений на ряд послідовних умовно залежних елементарних подій, описаних в роботах [3, 4]. Об'єднання цих подій за законами теорій ймовірності моделює процес уловлення пилу розпиленою рідиною.

В математичному вигляді ефективність пилоочищення в скрубери Вентурі було представлено у вигляді:

$$E = E_{T.B} \cdot r_0 = r_3 \cdot r_{зйткн} \cdot r_{ут} \cdot r_{зах} \cdot (1 - r_{вин}) \cdot r_0. \quad (1)$$

Для ефективного уловлення рухомих пилинок краплями диспергованої рідини необхідне виконання шести сумісних послідовних умовно-залежних подій, а саме: геометрична зустріч пилинки на шляху свого руху з краплею r_3 , зіткнення пилинки з краплею $r_{зйткн}$, утримання пилинок краплею $r_{ут}$, захват пилинок із поглинанням їх краплями $r_{зах}$, випарення утворених найменших конгломератів «крапля-пилинка» $r_{вин}$ та осадження конгломератів у крапле вловлювачах r_0 .

Кожна з подій відбувається з певною ймовірністю та впливає на здійснення наступних. Ці події описуються теоретичними формулами, які враховують технологічні, конструктивні та експлуатаційні параметри процесу. При їх об'єднанні через вираз загальної ймовірнісної ефективності пилоочищення (1) виходить математична модель процесу в цілому. За допомогою такої моделі можна в подальшому оптимізувати найбільш важливі параметри режиму роботи газоочищувальних установок із трубами Вентурі як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації.

Викладення основного матеріалу. Перша подія – це зустріч пилинки із краплею r_3 . Ймовірність такої зустрічі залежить від інерційних $r_{3,i}$, турбулентних і електростатичних сил $\Delta r_{3,m.e}$:

$$r_3 = r_{3,i} + \Delta r_{3,m.e}. \quad (2)$$

Якщо зону ефективного контакту пилинок із краплями в трубі Вентурі розділити на умовні шари $n_{ш}$, товщина яких дорівнює середньому діаметру краплі, то ймовірність зустрічі за рахунок сил інерції із урахуванням ймовірності $r_{3,i,i_{ш}}$ за кожним окремим шаром визначиться за формулою:

$$r_{3,i} = 1 - (1 - r_{3,i,i_{ш}})^{n_{ш}}, \quad (3)$$

$$r_{3,i,i_{ш}} = \frac{\sum S_{k,i_{ш}}}{S_r}, \quad (4)$$

де S_r – площа перерізу горловини, м².

Сумарна площа перекриття i -го шару визначається формулою:

$$\sum S_{k,i_{ш}} = \frac{\pi(D_{k,i} + d_{n.сп})^2}{4} \cdot N_{k,i_{ш}}, \quad (5)$$

де $D_{k,i}$ – діаметр крапель i -ї фракції; $d_{n.сп}$ – середній діаметр пилинки; $N_{k,i_{ш}}$ – кількість крапель i -ї фракції у шарі.

Після підстановки у формулу (4) кінцевих виразів для кожної величини отримаємо ймовірність зустрічі пилінки із краплею у шарі за час $\tau_{ш}$:

$$r_{з.і.ш} = \frac{1,5 \cdot (D_{к.і} + d_{п.ср})^2 \cdot m_p \cdot \tau_{ш}}{S_z \cdot \rho_p \cdot D_{к.і}^3}. \quad (6)$$

Ймовірність зустрічі пилінки із краплею за рахунок турбулентних електростатичних сил, згідно досліджень [6] визначається як:

$$\Delta r_{з.м.е} = \frac{V_{з.м.е}}{V}, \quad (7)$$

де $V_{з.м.е}$ - об'єм газопилового потоку навколо крапель, у якому діють турбулентні та електростатичні сили, m^3 ; V - загальний об'єм пилового потоку, m^3 .

Із урахуванням вищевикладеного, ймовірність зустрічі краплі і пилінки в трубі Вентурі визначиться за формулою:

$$r_3 = 1 - \prod_{i=1}^{n_{ш}} (1 - r_{з.і}) = 1 - \left[1 - (r_{з.і} + \Delta r_{з.т.е.і}) \right]^{n_{ш}}. \quad (8)$$

Друга подія – зіткнення пилінки із краплею можливе тільки у випадку, коли сили інерції та адгезії (турбулентні та електростатичні) перевищують сили аеродинамічної дії при обтіканні газовим потоком частинок, які потрапили у зону зустрічі. Його ймовірність може бути виражена формулою:

$$r_{зіткн} = r_{зіткн.і} + \Delta r_{зіткн.м.е}. \quad (9)$$

Значення $r_{зіткн.і}$ визначається за законом Стокса та може бути розраховано за рівнянням Ленгмюра [6,7]:

$$r_{зіткн.і} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{Stk_{ij}^2}{(Stk_{ij} + 0,125)^2} \cdot m_i \cdot n_j, \quad (10)$$

де M , N – кількість фракцій крапель та пилу; m_i , n_j – масова доля крапель та пилинок кожної фракції; Stk_{ij} - критерій Стокса, визначається з [6] за формулою:

$$Stk_{ij} = \frac{\rho_n \cdot d_{н.ср}^2 \cdot (\bar{v}_n - \bar{v}_{к.ср.і})}{18 \cdot D_{к.ср.і} \cdot \mu_z}. \quad (11)$$

Третя подія – утримання пилінки на поверхні краплі можлива тільки у випадку, коли адгезійні сили перевищують сили аеродинамічної дії потоку на краплю із пилінкою. Ймовірність цієї події визначиться відношенням маси утриманих пилинок до загальної маси пилинок в потоці:

$$r_{ут} = \frac{M_{н.ум}}{M_n} = \frac{\sum_{j=d_{н.макс}}^{j=0} d_{н.ут.і}^3 \cdot n_j}{\sum_{j=0}^{\infty} d_{н.і}^3 \cdot n_j}, \quad (12)$$

де $d_{н.макс.і}$ – максимальний діаметр пилинок, що утримуються краплями i -го розміра, м.

Значення $d_{н.макс.і}$ визначається з умови щоб сила тяжіння пилинок була рівною або перевищувала силу лобового опору краплі, за формулою:

$$d_{n_{\max j}} \leq 0,116 \frac{Re^{0,7}}{\rho_n \cdot (\bar{v}_n - \bar{v}_{к.ср.})^2} \cdot \frac{\sigma_{p.z.d} (1 + \cos \Theta_d)^2}{\sin \Theta_d (1 - \cos \Theta_d)}, \text{ м}, \quad (13)$$

де $\sigma_{p.z.d}$ – поверхневий натяг на границі розподілу рідина-газ через час $\tau_{ад}$, Дж/м²; Θ_d – динамічний крайовий кут змочування, град.

Основні положення, виведення формули (13) та вибір параметрів $\sigma_{ж.с.д}$ и Θ_d детально розписані в роботах [2, 8, 9].

Четверта подія – захоплення пилинки краплею. При його виконанні відбувається повне змочування пилинки, занурення останньої вглиб краплі та звільнення поверхні краплі для уловлення наступних пилин. Умовою ефективного захоплення пилинки краплям шляхом занурення їх у рідину є перевищення сили інерції над силами поверхневого натягу уловлюю чого розчину (води). Ймовірність цієї події визначається відношенням маси захоплених пилин до загальної маси пилин у потоці та розраховується за формулою:

$$r_{\text{зах}} = \frac{M_{n.z}}{M_n} = \frac{\sum_{j=d_{n.z.\min}}^{\infty} d_{n.z.j}^3 \cdot n_j}{\sum_{j=0}^{\infty} d_{n.j}^3 \cdot n_j}. \quad (14)$$

Мінімальний радіус пилин, що захоплюються краплями за рахунок сил інерції та адгезії, визначаються виразом [2]:

$$d_{n.z.\min} \geq \frac{12\sigma_{p.z.di} \cdot (1 - \cos \Theta_{di})}{\rho_n \cdot (\bar{v}_n - \bar{v}_{к.ср.})^2}. \quad (15)$$

Загальну ймовірність захоплення $r_{\text{зах}}$ фактично необхідно приймати більшу, ніж виходить за формулою (15), так як ступінь покриття крапель пилинками K_{ni} у більшості випадків менше одиниці. Виходячи з цього:

$$r_z = r_{z.u} + (1 - r_{z.u}) \left(1 - \sum_{i=1}^M K_{ni} \cdot m_i\right) \quad (16)$$

Ступінь покриття K_{ni} розраховується за формулою:

$$K_{ni} = \frac{K \cdot S_{\kappa_i} \cdot v_{\kappa} \cdot D_{\kappa_i} \cdot \rho_{ж}}{4d_{n.ср} \cdot \rho_n \cdot m_{ж.ф}} \quad (17)$$

де K – концентрація пилу в потоці, кг/м³; $d_{n.ср}$ - середній розмір пилин, м; $m_{ж.ф}$ – фактична витрата рідини, кг/с.

У тих випадках, коли $K_{ni} \leq 1$, повне захоплення пилин краплею не обов'язкове. Через це $r_{\text{зах}}$ можна приймати рівною одиниці.

Привеликих концентраціях пилу ступінь покриття може перевищувати одиницю. Тоді загальна ймовірність захоплення відносно формулі (15) буде меншою, ніж r_z .

П'ята подія – це можливе випарення рідкої фази конгломератів «крапля-пилінка» $r_{\text{вип}}$, після чого пилінка виявляється невловленою. Через короткочасне (соті частки секунди) перебування в трубі Вентурі випаритися встигають лише найменші краплі (діаметром менше 10мкм), але вони несуть на

собі й найменші пилінки, які важко уловити у кінцевому уловлювачі. Внаслідок цієї події, ефективність очищення може виявитися менше потрібної. Для зменшення та навіть виключення випарення необхідно встановлювати утилізатори теплоти для зниження температури газу перед трубами Вентурі або, що економічно не вигідно, збільшувати витрату води. Значення ймовірності випарення крапель визначається за формулою:

$$r_{\text{вип}} = \frac{M_{\text{к.вип}}}{M_{\text{к}}} = \frac{\sum_{i=d_{\text{к.вип.макс}}}^{\infty} d_{\text{к.і}}^3 \cdot m_i}{\sum_{i=0}^{\infty} d_{\text{к.і}}^3 \cdot m_i} \quad (18)$$

Згідно досліджень [10], максимальний діаметр крапель, які можуть випаритися в даних умовах, визначається за формулою:

$$d_{\text{к.вип.макс}} = \sqrt{\frac{12\mu \cdot P_{\text{н.п}} \cdot (1-\varphi)}{\rho_p \cdot R \cdot (273+t)}} \cdot (0,22 + 0,0015t) \cdot 10^{-4} \cdot [1 + \beta \sqrt{\text{Re}} \cdot \sqrt[3]{\text{Sc}}] \cdot \frac{l}{v_{\text{к.ср}}}, \text{ м}, \quad (19)$$

де μ - молекулярна маса рідини (для води $18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль); φ - відносна вологість очищуваного газу; $P_{\text{н.п}}$ - тиск насичених парів рідини в газі, Па; t - температура очищуваного газу, °С; R - універсальна газова стала, рівна 8,31 Дж/моль·град; Re і Sc - критерії Рейнольдса та Шмідта; β - коефіцієнт, що залежить від числа Re ; l - довжина прольоту краплі, м.

Шоста подія – осадження краплі з уловленими пилінками r_o визначає ефективність уловлення збільшених та зкоагульованих утворень «крапля-пилінка» за рахунок різноманітних сил (гравітації, доцентрових). Тут враховується осадження не тільки крапель більших за розміром, ніж пилінка, але й великих пилинок, які зіткнулися із краплями менших розмірів. Процес осадження конгломератів «крапля-пилінка» відбувається в окремому апараті, встановленому за трубою Вентурі. Залежно від виду виробництва та інших факторів, технологічної схеми можуть бути використані різноманітні краплєвловлюючі пристрої (циклони, полі скрубери, жалюзійні решітки). В будь якому випадку ймовірність осадження буде визначалася відношенням маси крапель, що осадженні в краплєвловлювачі, до загальної маси крапель:

$$r_o = \frac{M_{\text{к.о}}}{M_{\text{к}}} = \frac{\sum_{i=d_{\text{к.о.мін}}}^{\infty} m_i}{\sum_{i=1}^{\infty} m_i}, \quad (20)$$

де $d_{\text{к.о.мін}}$ – мінімальний розмір крапель з пилінками, що уловлюються у краплєвловлювачі.

Наприклад, для циклонів, згідно [4], він може бути визначений за формулою:

$$d_{\text{к.о.мін}} = 3 \cdot \sqrt{\frac{V_z \cdot \mu_z}{2\pi \cdot v_z^2 \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_z)}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{2D_{\text{мп}}}{3D_{\text{ц}}}\right)^4}{\frac{H - H_{\text{ц}}}{D_{\text{ц}} - D_{\text{е}}} \cdot \frac{D_{\text{ц}}^3 - D_{\text{е}}^3}{D_{\text{ц}}^2} + H_{\text{ц}} - h_{\text{мп}} \cdot \left(\frac{D_{\text{мп}}}{D_{\text{ц}}}\right)^2}}}} \quad (21)$$

Для інших типів крапле вловлювачів $d_{к.о.мін}$ буде розраховуватися за іншими формулами.

Висновки. Приведені залежності (1)–(21) є основою математичної моделі процесу пило очищення газів в скруберах Вентурі. Із використанням цієї моделі буде розроблена комплексна програма розрахунку для ЕОМ. Вона дозволить досліджувати вплив фізико-хімічних властивостей очищеного газу, пилу, уловлюючої рідини та інших параметрів на процес пиловловлення та досягнення потрібної ефективності очищення газу, а також виповнювати оптимізацію конструктивних розмірів та технологічних режимів роботи скрубєрів із трубами Вентурі.

Література

1. Качан В. Н. Теоретические основы очистки воздуха / В. Н. Качан, А. Г. Акинина. – Макеевка : ДонГАСА, 2001. – 130 с.
2. Физико-химические основы пылеподавления и предупреждения взрывов угольной пыли / В. И. Саранчук, В. Н. Качан, В. В. Рекун и др. – Киев : Наук. думка, 1984. – 216 с.
3. Качан В. Н. Оптимизация параметров обеспыливания воздуха и предупреждения взрывов пыли в угольных шахтах: автореф. дис. докт. техн. наук / Владимир Николаевич Качан. – Макеевка, 1996. – 46 с.
4. Страус В. Промышленная очистка газов / В. Страус; пер. с англ. – М. : Химия, 1981. – 616 с.
5. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М. : Химия, 1972. – 248 с.
6. Фукс Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
7. Лэнгмюр И. Искусственное осаждение кучевых облаков при температуре выше 0°С в результате цепного процесса / И. Ленгмюр. – В кн.: Физика образования осадков. – М. : Изд-во иностр. лит., 1951. – С. 147–189.
8. Сумм Б. Д., Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М. : Химия, 1976. – 232 с.
9. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М. : Химия, 1976. – 416 с.
10. Фукс Н. А. Испарение и рост капель в газообразной среде / Н. А. Фукс. – М. : Изд-во АН СССР, 1958. – 162 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЫЛЕОЧИСТКИ ГАЗОВ В СКРУББЕРАХ ВЕНТУРИ

Довгальук В. Б., Качан И. А.

Описана математическая модель гидродинамических и массообменных элементарных процессов-событий при пылеулавливании в скрубберах Вентури. Эти события объединены в общую формулу эффективности очистки газов от пыли, полученную в соответствии с блок-схемой, разработанной на основе вероятностного метода моделирования.

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF GASES DUST CLEANING IN VENTURI SCRUBBERS

Vladimir B. Dovgaluk, Irina A. Kachan

The mathematical model of hydrodynamic and mass transfer of elementary processes-events in the dust collecting in the Venturi scrubber is described. These events combined in a general formula of efficiency gas cleaning dust obtained in accordance with the block diagram, based on probabilistic modeling method.