

Рис 1 - Пристрій контролю

#### Список використаних джерел

1. S. Z. Kuliev. An approach to determining the hydraulic resistance coefficient of a pipeline section under an unsteady flow regime / *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, April 2015, Volume 9, Issue 2, pp 241–250.
2. Стась С. В. Особливості руху води та водних розчинів піноутворювачів через рукавні розгалуження / С. В. Стась // *Промислова гідраліка і пневматика*. - 2018. - № 1. - С. 19-24. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/inhpn\\_2018\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/inhpn_2018_1_4).
3. F. R. Myers. The Benefits of Standard Starting Engine Pressure. / *Fire apparatus & Emergency Equipment*. Volume 23. Issue 3. – 08.01.2018.
4. Биченко А. О. Система дистанційного моніторингу параметрів потоку вогнегасної речовини в пожежних рукавах/ А. О. Биченко, М. О. Пустовіт, О. М. Землянський, О. І. Мигаленко // VIII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»// Черкаси. – 2018. – С. 74-76.

УДК 66.041.491

Щербина В.Ю., д.т.н., проф., Швачко Д.Г., асистент, Борщик С.О., ст. викладач  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

## РОЗДІЛЕННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ В ЗАПІЧНИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ ОБЕРТОВИХ ПЕЧЕЙ

**Анотація.** На прикладі циклонного теплообмінника обертових печей розглядається питання моделювання процесу розділення гетерогенних систем в циклонних вихрових апаратах. В роботі використовується узагальнена модель розділення аерозольних гетерогенних системи, яка дозволяє досліджувати поведінку частинок матеріалу в теплообміннику з можливістю вивчення процесу розділення та траєкторії руху частинок, отримати поле швидкостей і час перебування частинок матеріалу в апараті.

**Ключові слова:** циклонний теплообмінник, вихрові апарати, дисперсійне середовище, швидкість, траєкторія руху.

Процеси розділення гетерогенних систем складають основу багатьох виробництв гірничорудної, нафтохімічної, хімічної, харчової та інших галузей промисловості [1, 2]. При цьому найбільш поширеними апаратами для є циклонні вихрові апарати які поєднують компактність, простоту конструкції, надійність з високою інтенсивністю розділових процесів. Подібні апарати знайшли широке застосування у вигляді циклонних теплообмінників, які у поєднанні з обертовими печами використовуються для виробництва в'язучих [3].

Дана робота, присвячена розвитку методів моделювання та дослідження процесу розділення гетерогенних систем в циклонних вихрових апаратах включаючи визначення траєкторії руху, швидкості, часу перебування частинок в апараті, спрямована на підвищення ефективності та в загальному випадку зниженню енерговитрат вказаного обладнання.

Незважаючи на простоту конструкції та велику кількість інформації отриманої експериментально [1 – 4] моделювання вказаних апаратів залишається однією з головних проблем при проектуванні промислових установок так як багато питань залишилися невирішеними, особливо пов'язаними з їх розрахунками. При експериментальному підході відсутня узагальненість результатів, а при теоретичному виникають труднощі математичного характеру, тому зазвичай задача розглядається з уведенням відповідних спрощень [6], які суттєво спрощують фізику процесу.

Рух частинки в перетині вихрового апарату, враховуючи відсутність взаємних зіткнень [4, 5, 7] можливо записати у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$m_k \frac{d^2 \vec{R}_k}{dt^2} = \sum \vec{F}_{B3_k} + \vec{F}_{3H_k} \quad (1)$$

де  $\vec{F}_{B3_k}$  – сила взаємодії частинки з іншими;  $\vec{F}_{3H_k}$  – рівнодіюча зовнішніх сил на частинку  $k$  – тої дисперсної фази;  $m_i$  – маса частинки  $k$  – тої фази;  $\vec{R}_k$  – радіус вектор частинки.

Систему рівнянь (1) доповнюється початковими умовами, тобто швидкістю дисперсійного середовища та значеннями координат частинок при надходженні їх в апарат. Враховуючи, що сила тяжіння суттєво менша інерційних сил масовою силою та  $\vec{F}_{B3_k}$  можливо знехтувати.

Для визначеної фази маємо:

$$m_k \frac{d^2 \vec{R}_k}{dt^2} = m \cdot \left[ \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} V_{(m)}^i \right] \quad (2)$$

Після відповідних перетворень, враховуючи, що  $\vec{F}_{3H_k} = F_{Di} \cdot n_i$  ( $F_{Di}$  – сила опору середовища, а  $n_i$  – число частинок в одиниці об'єму), отримуємо розрахункову формулу для визначення руху частинок матеріалу при ламінарному режимі:

$$\frac{\partial V^i}{\partial \tau} + V^m \frac{\partial V}{\partial x^m} + V^m \Gamma_{mj}^i V^j + k_l V^i = k_l V_c^i \quad (3)$$

де  $\Gamma_{mj}^i$  – символ Кристоффеля 2 роду.

В циліндричних координатах рівняння (3) буде мати вигляд:

$$\frac{\partial V^{i''}}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial V^{i''}}{\partial x^n} C_{m''}^n + \Gamma_{m''j''}^{i''} V^{j''} \right) V^{m''} + k V^{i''} = k_l V_c^{i''} \quad (4)$$

Аналогічно для турбулентного режиму:

$$\frac{\partial V^{i''}}{\partial \tau} + V^{m''} \frac{\partial V}{\partial x^n} + \Gamma_{m''j''}^{i''} V^{j''} V^{m''} + k_l V^{i''} V^{i''} - 2k_l V^{i''} V_c^{i''} = k_l V_c^{i''} V_c^{i''} \quad (5)$$

Можливість зіткнення частинки з перешкодою враховується по емпіричній залежності, що підтверджується експериментальними дослідженнями [7].

$$V_{n2} = (1 - 0.4159\beta + 0.4994\beta^2 - 0.292\beta^3) \cdot V_{n1} \quad (6)$$

$$V_{\tau2} = (1 - 2.12\beta + 3.0775\beta^2 - 1.1\beta^3) \cdot V_{\tau1}$$

де  $V_{n1}, V_{\tau1}$  — складові швидкості частинки перед зіткненням;  $V_{n2}, V_{\tau2}$  — складові швидкості після зіткнення;  $\beta$  – кут між дотичною до поверхні перешкоди чи стінки та напрямком швидкості до зіткненням.

На основі викладених методів розроблений пакет прикладних програм для моделювання траєкторії руху частинок в циклонному теплообміннику. Розрахунок виконувався методом скінчених різниць ітераційним методом з використанням явної схеми.

Для перевірки математичної моделі та алгоритмів розрахунку траєкторії руху частинок розглянутий запічний теплообмінник обертової печі 4x60м. Геометричні розміри теплообмінника представлені на рис.1а. Швидкість газоповітряного потоку (дисперсійного середовища) становить  $V^1=2.5\text{м/с}$ ;  $V^3=4.3\text{м/с}$ .

Результати розрахунку приведені на рисунку, де показані схема теплообмінника, вектори швидкості та траєкторія руху частинок відповідного дисперсного складу.

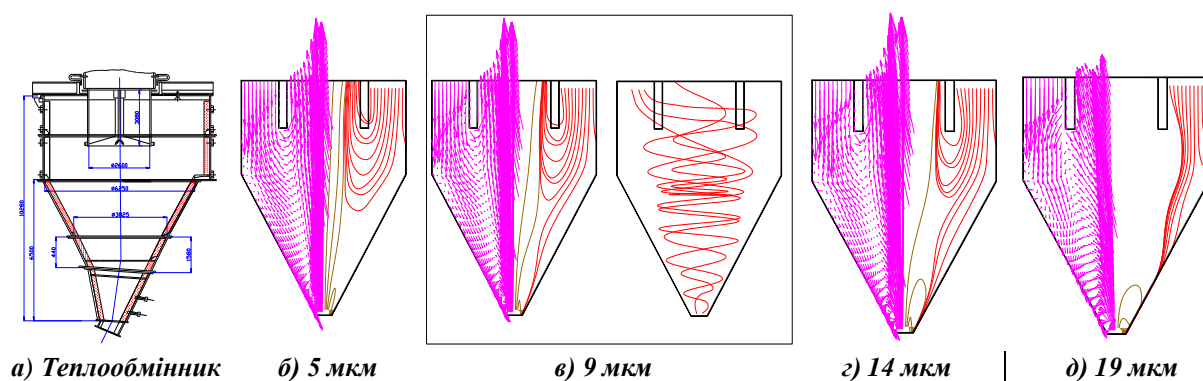


Рис. 1 - Швидкість ( $v^1+v^2$ ) та траєкторія руху частинок в теплообміннику ( $v^3$  не показана)

Як слідує з отриманих даних траєкторія руху найменших частинок, рис. б – рис. в, відповідає траєкторії руху дисперсійного середовища. Потрапляючи разом з потоком у вхідний патрубок теплообмінника вони спільно з потоком направляються у вихідний патрубок.

Інакше поведуться себе частинки середнього розміру, рис. г. З рисунку видно, що, за рахунок дії відцентрових сил деякі частинки можуть змінити напрямок руху і потрапити на стінки апарату або в розвантажувальний патрубок, чи потрапити в потік рідини внаслідок зменшення дії відцентрової сили. Частинки можуть досить тривалий час перебувати в апараті з однаковою імовірністю потрапити в розвантажувальний чи відвідний патрубки.

Частинки більшого розміру, рис. д, потрапляють на стінку за досить незначний термін часу в конічній або навіть циліндричній частині теплообмінника і далі рухаються вздовж стінки до розвантажувального патрубка.

Таким чином з достатнім ступенем імовірності, можливо визначити траєкторію частинок та встановити час перебування не тільки загалом у вихровому апараті, але і різних його зонах, що особливо важливо для визначення ефективності роботи теплообмінника.

В результаті досліджень розроблена математична модель, алгоритми та програмне забезпечення для розрахунку і моделювання процесу розділення гетерогенних систем в теплообміннику обертової печі, що дозволяє досить повно описати поведінку частинок матеріалу з можливістю вивчення процесу розділення та визначення траєкторії руху частинок, швидкості та часу перебування в апараті.

В подальшому планується більш детальне розглянути питання ефективності розділення з врахуванням впливу температури та можливостей диспергування.

#### Список використаних джерел

1. Баранов Д.А. Процессы и аппараты химической технологии: Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по хим.-технол. направлениям и специальностям: В 5 т. / Д.А. Баранов [ и др.]. Под ред. А.М. Кутепова. - М.: Логос, 2001. – Т. 2: Механические и гидромеханические процессы - 599 с.: ил., табл.
2. Терновский И.Г. Гидроциклонирование / И. Г. Терновский, А. М. Кутепов; Рос. АН, Отделение физикохимии и технологии неорган. материалов. - М.: Наука, 1994. - 349 с. : ил.; 22 см.
3. Лисиенко В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справочное издание: в 2 кн / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. - Москва: Теплотехник, 2004. Кн.1.- 688 с, 24см.
4. Щербина В. Ю., Сахаров О.С., Сівецький В.І., Васильченко Г.М., Чжан Юлія. Математичне моделювання вихрових процесів в запічних теплообмінниках обертових печей. — К.: НТУУ "КПІ", 2006.— 137с.

5. Сахаров А.С., Щербина В.Ю., Величко Ю.М. Сахаров В.А. Коротеєва П.И. Математическая модель для исследования полей скоростей и давлений в механическом оборудовании промышленности строительных материалов // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2000. – №15. – С. 11-16.

6. Галич Р.В. Конструктивное усовершенствование вихревых аппаратов со встречными закрученными потоками / Р.В. Галич, А.Р. Якуба, В.И. Склабинский, В.Я. Стороженко // Хімічна промисловість України. - т 3. - 2013. - С.75-83.

7. Zhang Youlin (张佑林) Numerical modeling of the air flow in an inclined eccentric exchanger (斜顶偏心旋风筒的数值模拟研究) / Zhang Youlin (张佑林), Liu Wei Ha (刘伟华), В.Ю.Щербина (谢尔宾纳) // Cement Guide for New Epoch. — 2007. — Vol.13, № 8. — pp. 7–10.

8. Щербина В.Ю. Моделирование работы вихревого теплообменника в газовом потоке вращающейся печи / В.Ю. Щербина, Чжан Юліні (张佑林), Ю.В. Самиленко, В.В. Бобах // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. — 2009. — № 33. — С. 158—164.

УДК 630\*377.4:531.6

Щупак А. Л., асистент, Мачуга О. С., к.ф.-м.н., доц.  
НЛТУ України, м. Львів, Україна

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КОЛІСНОЇ ЛІСОТРАНСПОРТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ

*Анотація.* Рух лісотранспортувальної машини ґрунтовою поверхнею руху викликає процес утворення колії. Інтенсивність такого процесу залежить від тягово-швидкісних характеристик руху машини та від фізико-механічних властивостей ґрунтової маси. Істотна частина енергії, що генерує двигун машини, витрачається на енерговитрати, пов'язані з незворотними трансформаціями енергії, які класифіковані у дослідженні. Сумарна деформація є суперпозицією типізованих в роботі енерговитрат, а їх сумарне значення визначається із енергетичного балансу розглядуваної системи «машина – опорна поверхня руху».

*Ключові слова:* форвадер, колієутворення, деформування поверхні руху енерговитрати

Основним результатом підвищення енергетичної ефективності будь-якого процесу є зниження витрат енергії на одиницю продукції: підвищення кількісних показників виконуваної роботи, зменшення теплоти, яка передається у середовище. Ефективність роботи машини визначається низкою властивостей. Зокрема, експлуатаційні властивості формуються техніко-технологічними, економічними, екологічними, загально технічними показниками.

На процес первинного транспортування деревини впливають головним чином техніко-технологічні, виробничі та природно-кліматичні чинники. Ефективність роботи лісотранспортувальних машин та їх відповідність заданим умовам експлуатації оцінюють за допомогою експлуатаційних властивостей, головними з яких є техніко-експлуатаційні (продуктивність, паливна економічність) і лісівничо-екологічні (профільна та опорна прохідності).

Підвищення ефективності застосування лісотранспортувальних машин за рахунок росту продуктивності і мінімізації витрат енергетичних ресурсів тісно пов'язано зі зниженням негативного впливу машин на опорну поверхню. Однак на даний час моделі та методи, які дали б змогу прогнозувати зміну глибини колії від дії колісної машини під час транспортування деревини невідомі.

Мета дослідження – розроблення алгоритму вибору техніко-експлуатаційних параметрів роботи лісотранспортувальної машини – форвадера під час транспортування деревини, які дозволяють підвищити екологічну, економічну і експлуатаційну ефективність лісотранспортувальної машини з колісним рушієм. Це дозволить організаційно-технологічними заходами підвищити продуктивність форвадерів, зменшити витрати пального і зменшити екологічну шкоду під час транспортування деревини по ґрунтовій