

*velocity and temperature. The simulation results help to clarify the results of calculations of the parameters of extrusion, 3D printing and other polymer processing processes, as well as recommend the use of lubricant additives to increase productivity and prevent.*

*Prospects for further research may be modeling flow with a wall of melts with highly elastic properties.*

**Keywords:** melt, polymer, near-wall layer, modeling, viscosity.

#### References

1. Pugachevich P.P., Beglyarov E.M. Poverhnostnyie yavleniya v polimerah – M.: Himiya, 1982. – 198 p.
2. Loytsyanskiy L.G. Laminarniy pogranchnyiy sloy - M.: «Fizmat», 1962. – 479 p.
3. Kirpikov V.A., Shorin G.N. Vvedenie v teoriyu pogranchnogo sloya. Nauchnoe posobie. Pod redaktsiey d-ra fiz. nauk, professora Guhmana A.A. – M.: MИM, 1974. – 287 p.
4. Shiller G. Teoriya pogranchnogo sloya - M.: «Nauka», 1969. – 774 p.
5. Edmonson I.R., Fenner R.T. Polimerna inzheneriya, vip.. 16, 1975. – P. 49-56.
6. Sokolskiy A.L., Ivitskiy I.I. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment. Modern Scientific Research and their Practical application. 2014. Vol. J21410 . P. 137—140.
7. Sokolskiy O.L., Ivitskiy I.I., Sivetskiy V.I., Mikulonok I.O. Vznachennya v`yazkostI pristinnogo sharu u formuyuchih kanalah obladdannya dlya pererobki polimeriv. Naukovi visti NTUU «KPI». 2014. №2(94). P. 66—69.
8. Ivitskiy I.I. Polymer Wall Slip Modelling. Technology Audit and Production Reserves. 2014. Vol 5, N 3(19). P. 8—11.
9. Sokolskiy O.L., Sivetskiy V.I., Mikulonok I.O., Ivitskiy I.I. Chislove modelyuvannya vplivu pristinnogo sharu na protses teorii polimeru v pererobnomu obladdanni. Himichna promislolist Ukraini. 2013. №6. P. 34—37.

---

УДК 66.041.491

**ЩЕРБИНА В. Ю., д.т.н., проф.**

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ В ЦИКЛОННИХ ВИХРОВИХ АПАРАТАХ**

*На прикладі циклонного теплообмінника обертових печей розглядається питання моделювання процесу сепарації гетерогенних систем в циклонних вихрових апаратах. В роботі обґрунтований принцип сепарування частинок і сформульована узагальнена модель розподілу аерозольної системи з використанням збірників частинок поділюваних мас, яка базується на закономірностях руху пилоповітряної суміші. Запропоновано новий підхід до визначення розділової здатності на базі розрахунку руху дисперсійного середовища та дисперсних частинок з урахуванням явища зіткнення частинок з перешкодою та встановлення закономірностей руху частинок при взаємодії з робочими органами вихрового апарату. Розроблена математична модель, програмне забезпечення та виконані числові розрахунки які дозволяють визначити траєкторію руху, отримати поле швидкостей та час перебування частинок матеріалу в сепараційному апараті. Результати розрахунку також приведені в додатку у вигляді відео файлів.*

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

**DOI:** 10.20535/2617-9741.1.2019.171037

© Щербина В. Ю., 2019.

**Постановка проблеми.** Процеси поділів гетерогенних систем складають основу багатьох виробництв хімічної, нафтохімічної, харчової, гірничорудної, біологічної й інших галузей промисловості. У загальному випадку ці системи підрозділяють на рідкі і газові гетерогенні системи та сепаруються в устаткуванні, що відрізняється великою розмаїтістю. Методи поділу вибирають у залежності від характеру складових частин системи і стану фаз [1–3] з врахуванням фізичних і хімічних властивостей середовища, а також фази, що знаходиться в мілкороздробленому стані. Найбільш поширеними апаратами для сепарації є циклонні

вихрові апарати. Так для очищення газу від пилу використовуються циклони, для очищення суспензії чи рідини від домішок гідроциклони. Це зумовлено тим, що вказані апарати поєднують простоту конструкції, компактність, надійність з високою інтенсивністю розділових процесів, що дозволяє значно поліпшити класифікацію продуктів здрібнювання і збагачення.

Однак існують фактори, що утруднюють процес поширення вихрових розділовальних апаратів. Основним з них вважається відсутність вивірених методів розрахунку аеродинаміки розділових процесів і критеріїв переходу до великомасштабних установок від лабораторних моделей, що особливо важливо для циклонних теплообмінних апаратів [4] які використовуються в високотемпературних теплових агрегатах у поєднанні з обертовими печами для виробництва в'язучих. Тому робота, присвячена вирішенню науково-технічної проблеми по розвитку методів моделювання та дослідження процесу сепарації гетерогенних систем в циклонних вихрових апаратах, є вкрай актуальною і необхідною, так як спрямована на підвищення ефективності та в загальному випадку зниженню енерговитрат вказаного обладнання.

**Аналіз попередніх досліджень.** Незважаючи на конструктивну простоту сепараційних вихрових апаратів, та велику кількість експериментальної інформації [2, 5–9] про структуру закручених і рециркуляційних потоків та закономірностей процесів поділу, їхнє моделювання залишається однією з головних проблем при проектуванні промислових установок. Дотепер багато питань, пов'язаних з розрахунком промислових вихрових апаратів, залишилися невирішеними [9–12]. Експериментальний підхід не вирішує проблему, так як при цьому відсутня узагальненість результатів, а теоретичний обумовлений труднощами математичного характеру. Загальною науковою проблемою є відсутність універсальної та ефективної теоретичної моделі, яка давала б можливість однозначно прогнозувати і тим більше оптимізувати їхні параметри. Відсутність чіткої обґрунтованих рекомендацій з раціонального конструювання обмежує показники створюваних промислових апаратів і установок.

Складність математичної моделі обумовлена тим, що особливістю вказаних задач є наявність великої кількості складних явищ, зокрема врахування детерміновано-стохастичного характеру руху частинок в турбулентному закрученому потоці, що ускладнений взаємодією частинок зі стінками, однією з іншими та несучим турбулентним потоком, невизначеністю вхідних умов, можливою зміною числа і розміру частинок у результаті дроблення або коагуляції, зміною форми деформованих частинок, а також іншими причинами, що впливають на розв'язання задачі.

Зазвичай задача розглядається з уведенням відповідних спрощень, що часом спотворюють фізику процесу [2, 3, 7], хоча без вивчення тривимірної структури потоку неможливо вибрати правильні конструкторські рішення і знайти границі перехідних зон роботи вихрових апаратів, визначити, чи досягнута максимальна ефективність процесу поділу, і неможливо цілеспрямовано удосконалити конструкцію, технологічні параметри та поліпшити роботу вихрових апаратів [4].

**Метою роботи** є розробка математичної моделі та дослідження процесу сепарації гетерогенних систем в циклонних вихрових апаратах на основі науково обґрунтованих методів розрахунку гідромеханічних процесів поділу гетерогенних середовищ із твердою фазою, що включає визначення траєкторії руху, швидкості, часу перебування частинок в апараті.

#### **Виклад основного матеріалу**

**Обґрунтування принципу сепарування.** Для вирішення задач раціонального вибору процесу і режиму розділення в конкретних випадках, доцільно описати сутність сепарування гетерогенних систем з єдиних позицій. Незважаючи на деякі відмінності явищ, що відбуваються при розділенні гетерогенних систем, вони мають ряд подібних властивостей, які відбуваються незалежно від способу здійснення процесу. Ця обставина дозволяє представити загальний фізико-хімічний механізм процесів сепарування гетерогенних систем.

Вважаємо, що в результаті сепарації відбувається заповнення деяких робочих зон – збірників частинок (Рис. 1), в які потрапляють компонентами поділюваних продуктів чи фази сепарації поділюваної гетерогенної системи. Причому в цих збірниках знаходиться речовини, що по складу відрізняються від складу похідної системи. Таким чином у всіх процесах поділу має місце спрямоване перенесення маси.

Для аналізу процесу сепарації розглядається рух частинок поділюваної системи. При цьому використовуються поняття елементів маси поділюваних фаз, які протягом усього процесу сепарації не підлягають істотним змінам.

В самому загальному випадку поділ гетерогенних систем може відбуватися при розділенні твердих фаз до наступного стану (в загальному випадку до рівня молекул).

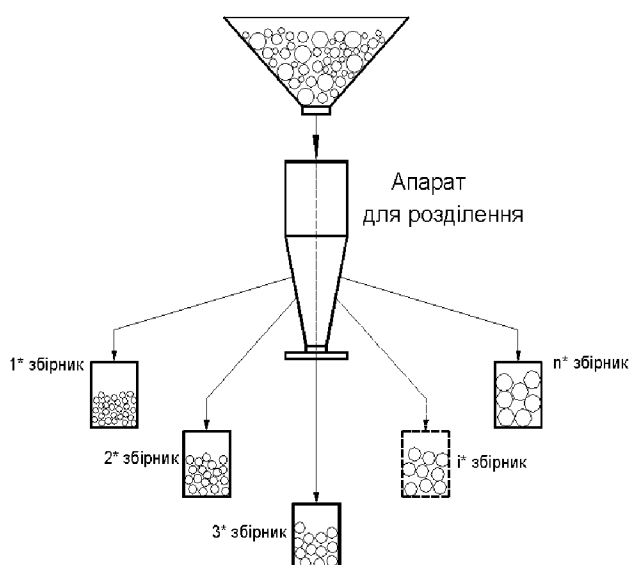


Рис. 1 – Схема розділення частинок дисперсної фази

розглядати детермінований рух частинок. В роботі пропонується розв'язання задачі у випадку руху детермінованих частинок для дисперсних систем.

**Математична модель та розрахунок.** Розглянемо рух частинки в перетині вихрового сепараційного апарату. При цьому неперервне досліджуване середовище замінюється дискретною сітковою моделлю. У вузлах сіткової області необхідно, щоб були задані складові швидкості потоку, щільність потоку і число Рейнольдса. Вказані дані можливо отримати користуючись методикою наведеною в [6].

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

де  $m_i$  - маса частинки  $k$  - тої фази;  $\vec{R}_k$  – радіус вектор частинки;  $\vec{F}_{B3_k}$  – сила взаємодії частинки з іншими;  $\vec{F}_{3H_k}$  – рівнодіюча зовнішніх сил на частинку  $k$  – тої дисперсної фази, сила опору середовища та зовнішня масова сила (наприклад, сила тяжіння).

Систему диференціальних рівнянь (1) необхідно доповнити початковими умовами, тобто задати швидкість дисперсійного середовища та значення швидкостей і координат частинок при надходженні їх в апарат.

Враховуючи, що сила тяжіння суттєво менша інерційних сил (на декілька порядків) масовою силою та  $\vec{F}_{B3_k}$  можна знехтувати. Сили взаємодії частинок при зіткненні, для теплообмінних апаратів, що розглядаються, відсутні або вкрай незначні.

Для визначеної фази маємо:

$$m_k \frac{d^2 \vec{R}_k}{dt^2} = m \cdot \dot{\vec{V}}_{(m)} \quad (2)$$

де

$$\dot{\vec{V}}_{(m)} = \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} \frac{\partial x_{(m)}^1}{\partial \tau} \quad (3)$$

Підставивши в (2) отримаємо:

Таким чином для спільності опису сутності процесів розділення необхідно описувати рух кожної частинки системи, а у випадках протікання хімічних реакцій навіть кожної молекули чи атома.

Необхідно і достатньо, щоб для здійснення будь-якого процесу поділу в результаті протікання процесу поділювані речовини виявилися в різних просторових зонах (областях), при цьому потрапляючи в призначені для них збірники. Отже сепарація гетерогенних систем відбувається в тому випадку, якщо сили, що діють на поділювані речовини забезпечують відносно переміщення складових фаз. Вказане дозволяє визначити ряд фізико-хімічних впливів, що приводять до поділу гетерогенних систем, і тим самим дає можливість виявити способи її інтенсифікації.

Розглядаючи агрегативно стійкі дисперсні системи розрахунок можливо виконувати для окремих частинок, не подрібнюючи їх на меші елементи. Для грубодисперсних систем можливо

$$m_k \frac{d^2 \bar{R}_k}{dt^2} = m \cdot \left[ \frac{\partial \bar{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} V_{(m)}^i \right] \quad (4)$$

Рівнодіючу зовнішніх сил на частку  $k$  – тої фази визначаємо з виразу:

$$\bar{F}_{\text{зв}_k} = F_{D_i} \cdot n_i \quad (5)$$

де  $F_{D_i}$  – сила опору середовища, а  $n_i$  – число частинок в одиниці об'єму.

Швидкість зміни імпульсу тіла відповідає силі опору середовища. Для сфери діаметром  $d$ , при використанні члену  $w^2/2$ , в загальному випадку матимемо:

$$F_D = [C_D \pi \rho_c d^2 w^2] / 8 \quad (6)$$

де  $C_D$  – коефіцієнт опору середовища.

Для ламінарного потоку опір середовища визначається по залежності:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (7)$$

Моделюючи траєкторію руху частинок матеріалу дисперсної фази підставмо в (6) значення (7) та отримаємо наступне визначається сила опору середовища для ламінарного режиму:

$$F_D = \frac{24}{\text{Re}} \cdot \frac{\pi \rho_c d^2 w^2}{8 \left( \frac{\rho_{\text{ж}} \pi d^3}{6} \right)} m = \frac{18 \nu \rho_c w^2}{\rho_{\text{ж}} w d^2} m = \frac{18 \nu \rho_c}{\rho_{\text{ж}} d^2} w m = k_l w m \quad (8)$$

де  $m$  – маса частинки,

$$k_l = 18 \frac{\rho_c \nu}{\rho_m d^2} \quad (9)$$

Рівняння (1) у цьому випадку, з врахуванням (4) та (8) буде мати вид:

$$k_l w m - m \cdot \left[ \frac{\partial \bar{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} V_{(m)}^i \right] = 0 \quad (10)$$

Оскільки  $w$  – швидкість руху точки щодо потоку, то:

$$w = \bar{V}_c - \bar{V}_m \quad (11)$$

де  $\bar{V}_c$  – швидкість середовища,  $\bar{V}_m$  – швидкість частинки. Тоді

$$\frac{\partial \bar{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} V_{(m)}^i + k_l \bar{V}_{(m)} = k_l \bar{V}_{(c)} \quad (12)$$

З рівняння (12) отримаємо розрахункову формулу для визначення руху частинок матеріалу:

$$\frac{\partial V^i}{\partial \tau} + V^m \frac{\partial V}{\partial x^m} + V^m \Gamma_{mj}^i V^j + k_l V^i = k_l V_c^i \quad (13)$$

У рівнянні (13)  $\Gamma_{mj}^i$  – символ Кристоффеля 2 роду який дорівнює:

$$\Gamma_{mj}^i = \frac{1}{2} g^{si} \left[ \frac{\partial g_{sj}}{\partial x^m} + \frac{\partial g_{sm}}{\partial x^j} + \frac{\partial g_{jm}}{\partial x^s} \right] = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 \left( g^{si} \left[ \frac{\partial g_{sj}}{\partial x^m} + \frac{\partial g_{sm}}{\partial x^j} + \frac{\partial g_{jm}}{\partial x^s} \right] \right), s = 1, 2, 3 \quad (14)$$

де  $g^{si}, (\partial g_{sj})$  – контраваріантні (коваріантні) компоненти метричного тензора.

Циклонні вихрові апарати зазвичай представляють собою вісесиметричну задачу, тому для переходу в циліндричні координати введемо індекс  $i''$ , після чого загальний вид рівняння (12) в буде мати вигляд:

$$\frac{\partial V^{i''}}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial V^{i''}}{\partial x^n} C_m^n + \Gamma_{m''j''}^{i''} V^{j''} \right) V^{m''} + k V^{i''} = k_l V_c^{i''} \quad (15)$$

Враховуючи, що  $r = x^{2''}, \Gamma_{3''2''}^{3''} = \Gamma_{2''3''}^{3''} = \frac{1}{r}, \Gamma_{3''3''}^{2''} = r$ , а інші  $\Gamma_{m''j''}^{i''} = 0$ , отримаємо для ламінарного режиму наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial V^{1n}}{\partial \tau} + V^1 \frac{\partial V^{1n}}{\partial x^1} + V^2 \frac{\partial V^{1n}}{\partial x^2} + k_t V^{1n} = k_t V_c^{1n} \\ \frac{\partial V^{2n}}{\partial \tau} + \left( V^1 \frac{\partial V^{2n}}{\partial x^1} + V^2 \frac{\partial V^{2n}}{\partial x^2} - r V^{3n} V^{2n} \right) + k_t V^{2n} = k_t V_c^{2n} \\ \frac{\partial V^{3n}}{\partial \tau} + \left( V^1 \frac{\partial V^{3n}}{\partial x^1} + V^2 \frac{\partial V^{3n}}{\partial x^2} + 2 \frac{1}{r} V^{2n} V^{3n} \right) + k_t V^{3n} = k_t V_c^{3n} \end{cases} \quad (16)$$

При турбулентному режимі коефіцієнт опору середовища становить:

$$C_D = 0.44. \quad (17)$$

Підставивши (17) в (6) отримаємо наступне визначається сила опору середовища для турбулентного режиму:

$$F_D = 0.44 \cdot \frac{\pi \rho_c d^2 w^2}{8 \left( \frac{\rho_m \pi d^3}{6} \right)} m = k_t w^2 m \quad (18)$$

$$k_t = 0.33 \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m d} \quad (19)$$

Враховуючи (4) та (18) маємо:

$$k_t w^2 m - m \cdot \left[ \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial \tau} + \frac{\partial \vec{V}_{(m)}}{\partial x_{(m)}^2} V_{(m)}^i \right] = 0 \quad (20)$$

Виконавши відповідні перетворення, отримаємо в циліндричних координатах:

$$\frac{\partial V^{in}}{\partial \tau} + V^{in} \frac{\partial V}{\partial x^n} + \Gamma_{m^i j^i} V^{j^i} V^{m^i} + k_t V^{in} V^{in} - 2k_t V^{in} V_c^{in} = k_t V_c^{in} V_c^{in} \quad (21)$$

Таким чином для турбулентного режиму маємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial V^{1n}}{\partial \tau} + V^1 \frac{\partial V^{1n}}{\partial x^1} + V^2 \frac{\partial V^{1n}}{\partial x^2} + k_t V^{1n} V^{1n} - 2k_t V^{1n} V_c^{1n} = k_t V_c^{1n} V_c^{1n} \\ \frac{\partial V^{2n}}{\partial \tau} + \left( V^1 \frac{\partial V^{2n}}{\partial x^1} + V^2 \frac{\partial V^{2n}}{\partial x^2} - r V^{3n} V^{2n} \right) + k_t V^{2n} V^{2n} - 2k_t V^{2n} V_c^{2n} = k_t V_c^{2n} V_c^{2n} \\ \frac{\partial V^{3n}}{\partial \tau} + \left( V^1 \frac{\partial V^{3n}}{\partial x^1} + V^2 \frac{\partial V^{3n}}{\partial x^2} + 2 \frac{1}{r} V^{2n} V^{3n} \right) + k_t V^{3n} V^{3n} - 2k_t V^{3n} V_c^{3n} = k_t V_c^{3n} V_c^{3n} \end{cases} \quad (22)$$

При побудові кінцево-різницевої дискретної моделі поставимо у відповідність безупинно визначеній функції  $V^{in}$  дискретну функцію  $\Phi^i$ , яка визначена у вузлах сітки. Для зручності позначимо  $V^{1n}$  як  $U$ ,  $V^{2n}$  як  $V$ ,  $V^{3n}$  як  $W$ . Отримаємо наступну систему рівнянь для ламінарного режиму:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi^1}{\partial \tau} + \frac{\partial (U \Phi^1)}{\partial x} + \frac{\partial (V \Phi^1)}{\partial y} + k_t \Phi^1 = k_t \Phi_c^1 \\ \frac{\partial \Phi^2}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial (U \Phi^2)}{\partial x} + \frac{\partial (V \Phi^2)}{\partial y} - r W W \right) + k_t \Phi^2 = k_t \Phi_c^2 \\ \frac{\partial \Phi^3}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial (U \Phi^3)}{\partial x} + \frac{\partial (V \Phi^3)}{\partial y} + 2 \frac{1}{r} V W \right) + k_t \Phi^3 = k_t \Phi_c^3 \end{cases} \quad (23)$$

Аналогічно для турбулентного режиму маємо:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi^1}{\partial \tau} + \frac{\partial(U\Phi^1)}{\partial x} + \frac{\partial(V\Phi^1)}{\partial y} + k_t \Phi^1 \Phi^1 - 2k_t \Phi^1 \Phi_c^1 = k_t \Phi_c^1 \Phi_c^1 \\ \frac{\partial \Phi^2}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial(U\Phi^2)}{\partial x} + \frac{\partial(V\Phi^2)}{\partial y} - rWW \right) + k_t \Phi^2 \Phi^2 - 2k_t \Phi^2 \Phi_c^2 = k_t \Phi_c^2 \Phi_c^2 \\ \frac{\partial \Phi^3}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial(U\Phi^3)}{\partial x} + \frac{\partial(V\Phi^3)}{\partial y} + 2\frac{1}{r}VW \right) + k_t \Phi^3 \Phi^3 - 2k_t \Phi^3 \Phi_c^3 = k_t \Phi_c^3 \Phi_c^3 \end{cases} \quad (24)$$

При моделюванні процесу сепарації необхідно враховувати, що теорія пилловловлення й очищення газів від твердих частинок звичайно виходить з положення, що кожне зіткнення її з перешкодою або поверхнею осадження завершується видаленням частинки з потоку, тобто уловлюванням [2, 7]. В даній роботі ефективність вихрового апарату визначалась можливістю проходження частинки від вхідного до розвантажувального патрубку, визначенням часу перебування частинки в теплообміннику, швидкості та траєкторії руху.

Розглядаючи питання зіткнення частинки з перешкодою потрібно зазначити, що величина відскоку і його величина суттєво впливає на загальну ефективність сепарації залежить кута зіткнення частинок зі стінкою, від швидкості, форми, механічних характеристик матеріалів, коефіцієнта тертя й інших параметрів. Однак теоретичний аналіз цих умов суттєво утруднений невизначеністю багатьох з перерахованих параметрів процесу, а існуючі математичні моделі для числового розрахунку малонадійні та дають суперечливі результати [7]. Тому для розрахунку доцільно використовувати емпіричні залежності, які підтверджуються експериментальними дослідженнями.

При зіткненнях із стінкою або елементом конструкції частинки втрачають енергію і змінюють напрямок руху. Для розрахунку траєкторії, після зіткнення зі поверхнею, необхідно визначити напрямок і величину вектору швидкості. Параметри відскоку мають стохастичний характер і в основному визначаються кутом під яким частинка потрапляє на поверхню. При розрахунках використані наступні вирази для визначення складових швидкості частинки після зіткнення [10]:

$$V_{n2} = (1 - 0.4159\beta + 0.4994\beta^2 - 0.292\beta^3) \cdot V_{n1} \quad (25)$$

$$V_{\tau2} = (1 - 2.12\beta + 3.0775\beta^2 - 1.1\beta^3) \cdot V_{\tau1} \quad (26)$$

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

На основі викладених математичних методів розроблений пакет прикладних програм, призначений для визначення траєкторії руху частинок матеріалу в циклонних теплообмінниках. Пакет програм являє собою набір програмних модулів виконаних на функціональних та алгоритмічних мовах програмування. Числовий розрахунок рівнянь математичної моделі здійснювався ітераційним методом з використанням явної схеми методом скінчених різниць. На функціональній мові AutoLisp виконані програми для візуалізації результатів розрахунку в графічному середовищі AutoCAD.

**Результати розрахунків.** Для апробації математичної моделі та алгоритмів для розрахунку траєкторії руху частинок матеріалу досліджений запічний теплообмінник пічного агрегату з піччю 4х60м Криворізького цементного заводу. Геометричні розміри теплообмінника представлені на рис.2а. У схемі розрахунку, моделюються циліндрична і конічна частини, що разом із вхідним патрубком, направляють потік тангенціально усередину циліндричної частини. Вихідний патрубок моделюється перешкодами конструкції на шляху газового потоку. Швидкість дисперсійного середовища (газово – повітряний потік) задається по компонентам  $V^1=2.5\text{м/с}$ ;  $V^3=4.3\text{м/с}$ .

Результати розрахунку приведені на рис. 2, де показані конструктивна схема теплообмінника, вектори швидкості та траєкторія руху частинок матеріалу відповідного дисперсного складу, від 1 мк до 26,0 мк. Приведені швидкості та траєкторії переміщення для найбільш характерних розмірів частинок. Також результати розрахунку наведені у вигляді відео файлів в додатку до статті.

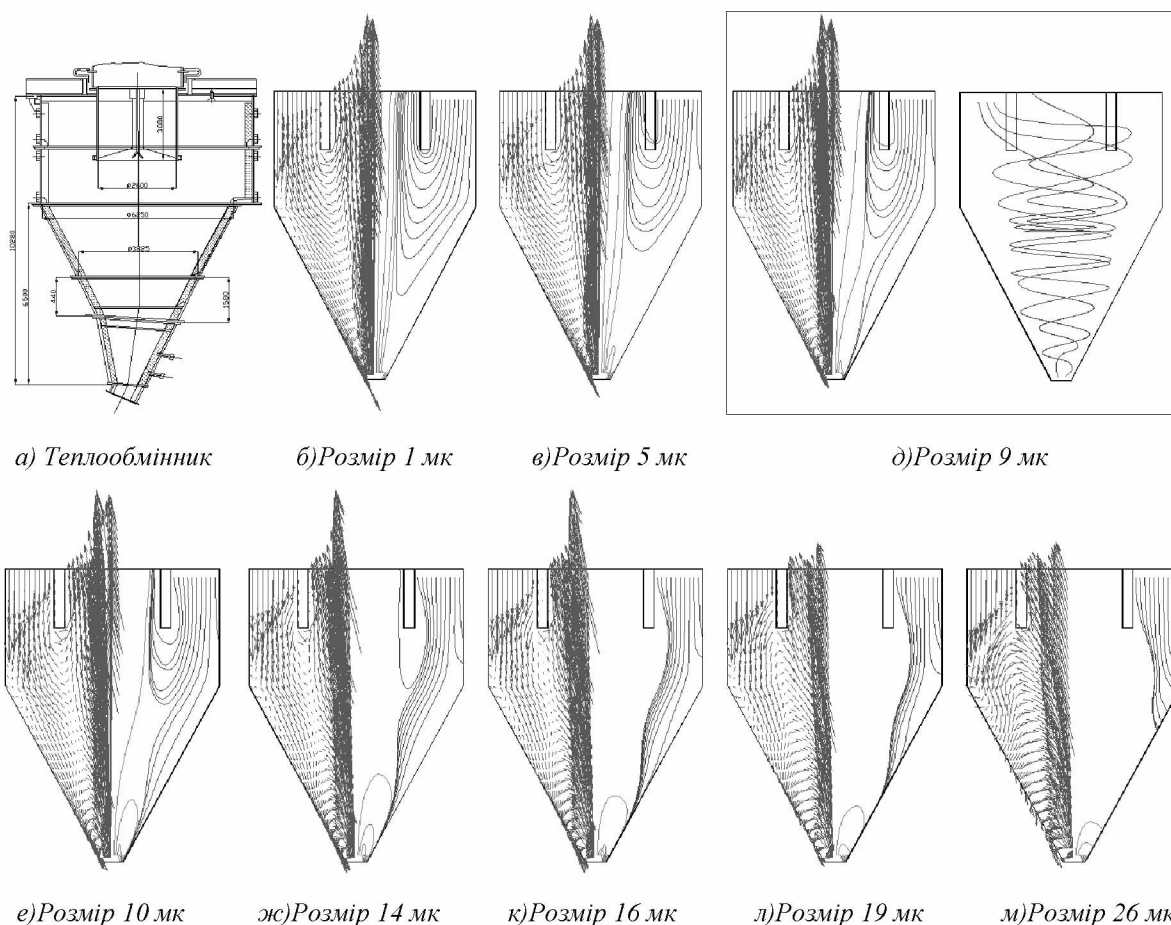


Рис. 2 – Траєкторія руху частинок та швидкість ( $v^1 + v^2$ ) в теплообміннику ( $v^3$  не показана)

Частинки, що потрапляють в теплообмінник разом з потоком рідини, залучаються в обертальний рух зі швидкістю, що наближена до швидкості дисперсійного середовища. При цьому частинки рухаються в осьовому та радіальному напрямках відповідно до діючих на них гідродинамічних, інерційних сил і сил опору руху які спільно впливають на траєкторію. Сума векторів сил у кожен момент часу визначає прискорення частинки, її швидкість і відповідно траєкторію.

На дрібні частинки суттєво впливає опір середовища, тому траєкторії їх руху майже співпадають з лініями току дисперсійного середовища, рис.2б – рис.2в. Як видно з графіків найменші частинки рухаються аналогічно дисперсійному середовищу. Деякі з них, що знаходяться на периферії вхідного потоку, також будуть потрапляти на конічних стінках апарата, а ті які знаходяться ближче до центру можуть потрапити у рециркуляційного ядро потоку і в остаточному підсумку потрапляють у вихідний патрубок. На частинки невеликих розмірів вплив відцентрових сил незначний і при досить малих розмірах рух частинок не істотно відрізняється від руху несучої рідини. Чим дрібніші частинки, тим більше на них впливає опір середовища і траєкторії руху співпадає з лініями току рідини. Найменші частинки розподіляються між вхідними і розвантажувальним патрубками в тім же співвідношенні, що і несуча рідина. З рисунків видно, що частинки розміром 6 мк та менше повністю потрапляють у вхідний патрубок.

Частинки середнього розміру поведуться себе інакше, рис.2д – рис.2ж. Деякі з них на менших радіусах обертання, за рахунок дії відцентрових сил, можуть змінити напрямок руху. Вказані частинки можуть потрапити на стінки апарата і вийти з нього через розвантажувальний патрубок, або повернутись в потік рідини внаслідок зменшення дії відцентрової сили. Вказані частинки можуть тривалий час циркулювати в робочій зоні з однаковою імовірністю потрапити в вхідний чи розвантажувальний патрубків. Вихід з даної

зони можливий за рахунок коагуляції, диспергування або зштовхуванням з іншими частинками. По зовнішньому вигляду вони відрізняються тим, що приймають більш круглясту форму. Згідно результатів розрахунку 87,2 % частинок фракції 14 мкм потрапляють у розвантажувальний, а 12,8% у відвідний патрубок, фракція 10 мкм – 33,8% у розвантажувальний, 66,2% відвідний патрубок, фракція 9 мкм – 20,0% у розвантажувальний, 80,0% у відвідний патрубок, фракція 7 мкм – 8,0% у розвантажувальний, 92,0% у відвідний патрубок.

Частинки більшого розміру, за рахунок дії відцентрових сил, будуть сепаруватися і потрапляти на стінку конічної або навіть циліндричної частини, рис.2к – рис.2м. Місце потрапляння в теплообмінник не має суттєвого впливу на траєкторію їх руху так як вказані частинки потрапляють на стінку за досить незначний термін часу і далі рухаються вздовж стінки до розвантажувального патрубка. Розмір вказаних частинок становить 16,0 мкм та більше.

З достатнім ступенем імовірності, можна визначити можливість потрапляння частинок конкретної фракції в відвідний або розвантажувальний патрубки. Визначення траєкторії частинок дає можливість встановити час їх перебування не тільки в цілому у вихровому апараті, але і різних його зонах, що особливо важливо для визначення ефективності роботи теплообмінника.

Використавши отримані результати, можливо отримати значення ефективності сепарування теплообмінника в залежності від швидкості потоку, розмірів фракцій та відсотку уловлення фракційних складових. Дані по сепаруванню, в залежності від розміру частинок показані на рис.3, вказаний час перебування частинок матеріалу різних фракцій в залежності від місця їх уведення в теплообмінник від випускної труби до стінки.

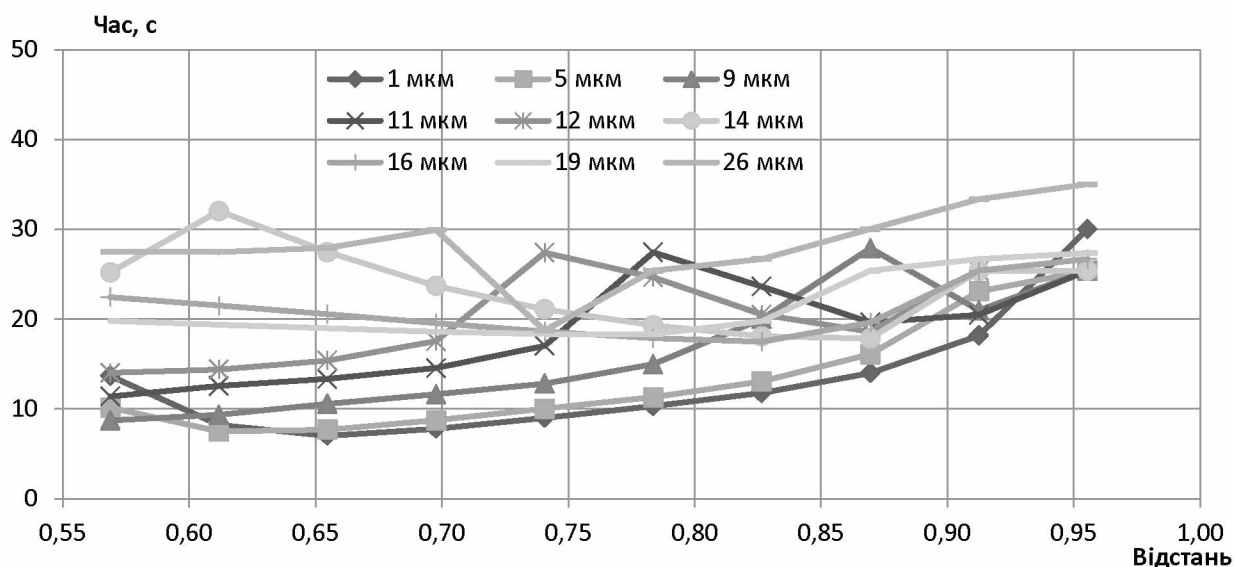


Рис. 3 – Час перебування частинок в теплообміннику при різних положеннях уведення

Як слідує з отриманих даних, час перебування частинки в теплообміннику змінюється в залежності від місця потрапляння. В загальному випадку час збільшується при наближенні до стінки від випускної труби теплообмінника. Дане явище пояснюється певною кількістю зіткнень частинки з стінкою та її відскоками. Отже частинка пройде більший шлях, ніж та, що знаходиться в потоці постійно.

На частинки розміром 16 мкм – 26 мкм місце потрапляння не суттєво впливає на час знаходження в теплообміннику. Вказані частинки практично відразу потрапляють на стінку і спрямовуються в розвантажувальний патрубок. Час їх перебування в теплообміннику становить від 8 с до 35 с, в залежності від місця уведення та розміру фракції. При збільшенні відстані від випускної труби до корпусу збільшується шлях котрий проходить частинка тому час її перебування в теплообміннику збільшується. З графіків також видно, що час перебування зменшується при збільшенні їхнього розміру частинки.

**Висновки.** Головним результатом проведених досліджень є розробка математичної моделі, алгоритмів та програмного забезпечення для розрахунку і дослідження процесу сепарації в циклонних вихрових



апаратах, що дозволяють досить повно описати поведінку частинок матеріалу з можливістю вивчення процесу розділення та визначенням траєкторії руху частинок, швидкості та часу перебування в апараті.

У результаті проведення досліджень:

- обґрунтоване визначення розподілу аерозольних систем з використовуючи поняття збірників частинок поділюваних мас, що ґрунтуються на вивченні математичних моделей і закономірностей руху газопилової суміші в конструкціях вихрових апаратів;

- використовуючи метод скінчених різниць розроблено числову методику та програмне забезпечення для розв'язання задач сепарації в циклонних вихрових апаратах, що дає можливість визначити швидкість, траєкторію руху, час перебування матеріалу в теплообміннику та в загальному випадку збільшити точність розрахунку;

- розроблено методику, математичні та програмне забезпечення для розрахунків ступені сепарації частинок дисперсної фази та фракційної ефективності циклонних теплообмінників;

- запропоновано рішення для розрахунку розділової здатності з урахуванням зіткнення частинок з перешкодою та визначення закономірностей їх руху при їх взаємодії з робочими органами вихрового апарату.

**Перспективи подальших досліджень.** Планується в подальшому виконати відповідні дослідження для більш детального розглянути питання ефективність поділу з врахуванням умов диспергування частинок та впливу зміни температури і внутрішнього/зовнішнього тиску на рух частинок і можливостей сепарації.

#### **Список використаної літератури**

1. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии. - 3-е изд., перераб./ П.Г. Романков - Л : Химия. Ленингр. отд-ние, 1982. - 287 с. : ил. ; 22 см. - Библиогр.: с. 278-281 (71 назв.). - Предм. указ.: с. 282-285
2. 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.
3. Терновский И.Г. Гидроциклонирование / И. Г. Терновский, А. М. Кутепов; Рос. АН, Отделение физикохимии и технологии неорганич. материалов. - М. : Наука, 1994. - 349 с. : ил.; 22 см.
4. 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.
5. Щербина В. Ю., Сахаров О.С., Сивецкий В.І., Васильченко Г.М., Чжан Юлія. Математичне моделювання вихрових процесів в запічних теплообмінниках обертових печей. — К.: НТУУ "КПІ", 2006.— 137с.
6. 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, виробництва та санітарна техніка. – 2000. – №15. – С. 11-16.
7. Ляпустин П. К Интенсификация и моделирование процесса сепарации в прямоточном циклоне. – Дисс. ... канд. техн. наук. - Ангарск: АГТА, 2005. - 189 с.
8. 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.
9. Коробченко К.В. Гидродинамика аппаратов с вихревыми и высокотурбулизованными потоками / К.В. Коробченко, А.Е. Артюхов, А.А. Ляпощенко, В.И. Склабинский // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. - 2010. – Вип. 37. – С. 310-315.
10. 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.
11. Щербина В.Ю. Моделирование работы вихревого теплообменника в газовом потоке вращающейся печи / В.Ю. Щербина, Чжан Юлія(张佑林), Ю.В. Самиленко, В.В. Бобах // Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка. — 2009. — № 33. — С. 158—164.

12. Щербина В.Ю. О повышении энергоэффективности вращающихся печей / В.Ю. Щербина, С.С. Лобко, Г.Н. Васильченко, С.В. Лелека // Матеріали для роботи в екстремальних умовах -6: 28 міжнар. конф. — Київ, НТУУ «КПІ», ІФФ, 2016. — С. 374—380.

Надійшла до редакції 15.03.2019

---

*Shcherbyna V. Yu.*

## **MODELING THE PROCESS OF SEPARATION IN CYCLONIC WIRING APPARATUS**

*The processes of division of heterogeneous systems form the basis of many chemical, petrochemical, food, mining, biological and other branches of industry. The most common are cyclone vortex devices. So, for the purification of gas from dust, cyclones are used to clean the suspension or liquid from impurities of the hydro-cyclone. This is due to the fact that the vortex devices combine simplicity of construction, compactness, reliability and high intensity of separation processes, which allows to significantly improve the classification of products of crushing and enrichment. However, there are factors that complicate the process of propagation of vortex cyclone vehicles. The main reasons for limited use are the lack of reliable methods for calculating the dynamics of separation processes and the criteria for switching from laboratory models to large-scale installations.*

*Despite the apparent structural simplicity of these devices and the availability of extensive experimental information on the structure of swirling and recirculation flows and the patterns of separation processes, their modeling remains one of the main problems in the design of industrial plants. To date, many issues remain unresolved. A purely experimental approach does not solve the problem, because in this case there is no generalization of research results, and the theoretical is due to the difficulties of mathematical nature.*

*The complexity of the motion of particles within the cyclone and the presence of a large number of unexplored factors that determine the processes of motion make the process of studying the trajectories of particles rather complicated. In addition, in the study of aerodynamic patterns of motion of particles, their trajectories are usually not studied, since in most cases the fact of removal or penetration onto the wall was investigated, not the path through which the particle passed to the removal. Such an approach in the case of industrial devices does not justify itself, because it does not allow to study the heat exchange between the particle and the aerodynamic flow. Therefore, the purpose of the work is to develop a mathematical model and study the process of separation of heterogeneous systems in cyclone vortex machines with the definition of the trajectory of motion, speed and time of the presence of particles in the apparatus. As an example in this paper, a cyclone heat exchanger used in rotary kilns for cement production has been investigated.*

*In order to solve these problems, the principle of particle separation is substantiated in the work, and a generalized model of the distribution of the aerosol system is formulated using mass collections of particles, which is based on the laws of the dust-air mixture movement.*

*The motion of particles was determined on the basis of the fundamental laws of mechanics of systems connected by systems of continuum mechanics equations, using proven mathematical apparatus of numerical methods, developed by numerical methods, algorithms and software.*

*An approach to the determination of separation capacity based on the calculation of the dispersion medium and disperse particles is proposed, taking into account the phenomenon of collision of particles with an obstacle and the establishment of patterns of motion of particles in their interaction with the working organs of the vortex apparatus.*

*The developed mathematical model, software and numerical calculations allow determining the trajectory of motion, obtaining a field of velocities and the residence time of material particles in a separation apparatus. The software is a package of application software modules executed on algorithmic and functional programming languages. Numerical calculation of the equations of the mathematical model was carried out by an iterative method using explicit scheme by finite difference method. In the functional language AutoLisp programs are implemented to visualize the calculation results in the AutoCAD graphical environment.*

*The calculation results are also included in the appendix in the form of video files.*

**Key words:** *separation, vortex apparatus, cyclone heat exchanger, dispersion medium, disperse phase, speed, trajectory of motion.*

*References*

1. Romankov P.G. *Gidromekhanicheskie processy himicheskoy tekhnologii*. - 3-e izd., pererab./ P.G. Romankov - L : Himiya. Leningr. otd-nie, 1982. - 287 s. : il. ; 22 sm. - Bibliogr.: s. 278-281 (71 nazv.). - Predm. ukaz.: s. 282-285
2. Baranov D.A. *Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii : YAvleniya perenosa, makrokinetika, podobie, modelirovanie, proektirovanie : Ucheb. posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po him.-tekhno. napravleniyam i special'nostyam : V 5 t. / D.A. Baranov [ i dr.]. Pod red. A.M. Kutepova*. - M. : Logos, 2001. - T. 2: *Mekhanicheskie i gidromekhanicheskie processy* - 599 s. : il., tabl.
3. Ternovskij I.G. *Gidrociklonirovanie / I. G. Ternovskij, A. M. Kutepov; Ros. AN, Otdelenie fizikohimii i tekhnologii neorgan. materialov*. - M. : Nauka, 1994. - 349 s. : il.; 22 sm.
4. Lisienko V. G. *Vrashchayushchiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie i ehkologiya: spravocnoe izdanie : v 2 kn / V.G. Lisienko, YA.M. SHCHelokov, M.G. Ladygichev; pod red. V.G. Lisienko*. - Moskva: Teplotekhnik, 2004. Kn.1.- 688 s, 24sm.
5. Shcherbina V. YU., Saharov O.S., Sivec'kij V.I., Vasil'chenko G.M., CHzhan YUlin. *Matematichne modelyuvannya vihrovih procesiv v zapichnih teploobminnikah obertovih pechej*. — K.: NTUU "KPI", 2006.— 137s.
6. Saharov A.S., Shcherbina V.YU., Velichko YU.M. Saharov V.A. Koroteeva P.I. *Matematicheskaya model' dlya issledovaniya polej skorostej i davlenij v mekhanicheskom oborudovanii promyshlennosti stroitel'nyh materialov // Budivel'ni materiali, virobi ta sanitarna tekhnika*. – 2000. – №15. – S. 11-16.
7. Lyapustin P. K *Intensifikaciya i modelirovanie processa separacii v pryamotochnom ciklone*. – Diss. .. kand. tekhn. nauk. - Angarsk: AGTA, 2005. - 189 s.
8. Galich R.V. *Konstruktivnoe usovershenstvovanie vihrevykh apparatov so vstrechnymi zakruchennymi potokami / R.V. Galich, A.R. YAkuba, V.I. Sklabinskij, V.YA. Storozhenko // Himichna promislovist" Ukraini*. - t 3. - 2013. - S.75-83.
9. Korobchenko K.V. *Gidrodinamika apparatov s vihrevymi i vysokoturbulizirovannymi potokami / K.V. Korobchenko, A.E. Artyuhov, A.A. Lyaposhchenko, V.I. Sklabinskij // Naukovi praci Odes'koï nacional'noï akademii harchovih tekhnologij*. - 2010. – Vip. 37. – S. 310-315.
10. *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), V. Yu. Shcherbyna (谢尔宾纳) // Cement Guide for New Epoch*. — 2007. – Vol.13, № 8. – pp. 7–10.
11. Shcherbina V.Yu. *Modelirovanie raboty vihrevogo teploobmennika v gazovom potoke vrashchayushchejsya pechi / V.Yu. Shcherbina, CHzhan YUlin( ), YU.V. Samilenko, V.V. Bobah // Budivel'ni materiali, virobi ta sanitarna tekhnika*. — 2009. — № 33. — S. 158—164.
12. Shcherbina V.Yu. *O povyshenii ehnergoehffektivnosti vrashchayushchihsya pechej / V.YU. SHCHerbina, S.S. Lobko, G.N. Vasil'chenko, S.V. Leleka // Materiali dlya roboti v ekstremal'nih umovah -6: 28 mizhnar. konf.* — Kiiy, NTUU «KPI», IFF, 2016. — S. 374—380.