

УДК 66.015.23

О.Б. ШАНДИБА

Сумський національний аграрний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ РЕПУЛЬПАЦІЙНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ПРОМИВАННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті розглянуто теоретичний підхід до розрахунку каскадної системи репульпаційних апаратів для промивання дисперсних матеріалів. Оптимізація масообмінних та кінетичних параметрів кожного зі ступенів каскада дозволить значно підвищити чистоту продукту та знизити витрати енергії і води. Детальним аналізом кінетики промивання в умовах диференційованої інтенсивності масовіддачі було обґрунтовано раціональний розподіл часу перебування (контакту) взаємодіючих потоків на ступенях каскаду.

Багатоступеневе промивання з диференційованим розподілом масообмінних параметрів, як і витрат води на ступенях, є ефективною системою для водо- та енергозбереження. Типовий приклад такого процесу стосується очищення сировини в металургії. Каскадний метод, представлений в цій роботі, використовує рівняння матеріального балансу та кінетики процесу при нерівності ефективності та масообмінних параметрів кожного ступеню промивання. Припущення, що забруднені застійні зони займають ідентичний об'єм  $q_i \neq idem$  на кожному ступеню промивання, а масообмінний параметр Фур'є  $Fo_i = k_i t_i \neq idem$  може змінюватись, ми можемо оптимізувати його розподіл по ступеням для досягнення максимальної ефективності каскаду. Інакше кажучи, таким чином досягається мінімум відношення  $\frac{C_{i+1}}{C_{i-1}} \Rightarrow \min$  за умов обмеженні витрат води, енергії та часу контакту взаємодіючих потоків на ступенях.

**Ключові слова:** промивна система, дисперсний матеріал, масообмінна характеристика, час контакту, суміжні ступені, енергозбереження, водоспоживання, концентрація хімічних забруднювачів.

A.B. SHANDYBA

Sumy National Agrarian University

### CASCADE SYSTEM OPTIMIZATION FOR WASHING OF DISPERSIVE MATERIALS

This article deals with a theoretical approach to the cascade washing system for dispersive materials. At the present time there is growing scientific concern about the washing system which provides important benefits compared to single-stage washing. Considering the effect of differential intensity of mass-transfer as the specific function of technological parameters on every stage gives some information to get the energy and/or water consumption. Our approach is to evaluate chemicals content changes for the coset two stages with different efficiency.

The multistage washing with differential distribution of mass-transfer parameters as well as water rate on the stages is an efficient system for energy and water-saving. The typical example of this process refers to cleaning of dispersive materials in metallurgy. The cascade method developed in this work utilizes the matter balance and kinetic equations under unequal efficiency and mass-transfer parameters of every stages.

Efficiency of washing process depends in a complex way on the mass-transfer parameters and water rate factors as follows:

$$E_i = \frac{x_i - x_{i+1}}{x_i} = \frac{1 - \exp[-k_i t_i (1 + Q_i^{-1})]}{1 + Q_i^{-1}} \text{ where } x_i, x_{i+1} - \text{ are initial and current average concentration of pollution into dispersion material;}$$

$k_i$  - is the volumetric coefficient of the mass-transfer;  $t_i$  - is the time of contact between dispersion material and water;  $Q_i$  - is the ratio of washing water rate  $Q_i$  to moisture zones rate of dispersion material  $q_i$

Assuming that contaminated stagnate zones volume are identical  $q_i \neq idem$  on the every stage but the mass-transfer Fourier numbers are unequal  $Fo_i = k_i t_i \neq idem$  we can find the optimal mass-transfer parameters distribution for maximum efficiency. In other

words, it is aimed to define the water rate and contact time for the coset two stage to deliver the minimum relation  $\frac{x_{i+1}}{x_{i-1}} \Rightarrow \min$  under

limited water, contact time and energy consumption.

**Key words:** washing system, dispersive materials, mass-transfer parameter, contact time, coset stages, energy saving, water consumption, pollution chemicals content.

**Вступ.** Промивання є найбільш розповсюдженим технологічним процесом очищення дисперсних матеріалів, поверхонь машин, деталей в багатьох галузях сучасного виробництва та побуті. В той же час, незважаючи на широке розповсюдження, процес залишається одним з найменш економічним з точки зору споживання води та небезпечним з екологічної точки зору [1–11].

Слід звернути увагу, що в більшості випадків промивання дисперсних матеріалів необхідно поєднувати з процесом відокремлення промивного розчину від твердої фази. При цьому зазвичай використовується громіздке відстійно-репульпаційне обладнання чи фільтри, на яких здійснюється згущення суспензії після кожного ступеня промивання. Необхідність в такій доволі витратній проміжній операції викликана значним розбавленням суспензії при промиванні, тобто зменшення відношення Т:Р. В свою чергу, подання розбавленої суспензії на послідовні ступені приведе до збільшення гідралічного виносу, зменшення відносних витрат промивної води  $Q'$  (витратна характеристика) і, в кінцевому рахунку,

до зниження ефективності промивання.

**Огляд попередніх досліджень та публікацій.** В попередніх роботах [1–3, 5, 7–9] було показано, що для досягнення максимальної ефективності в кожній зі ступеней, що входять в технологічний каскадний ланцюжок, повинно бути досягнуте оптимальне співвідношення масообмінної та витратної характеристик процесу. Це положення наглядно ілюструється три- та двовимірними експериментальними графіками (рис. 1а, б) ефективності промивання.

Неважко впевнитись, що економічні режими промивання розташовані в межах перегину графіків ефективності. Для цього припустимо, що промивання ведеться за межами цієї області, тобто робоча точка процесу знаходиться на прямолінійних ділянках цих графіків вище або правіше ділянок перегину. Робоча точка промивання на кожному ступеню визначається сполученням витратної та масообмінної характеристик. У випадку, коли «робоча точка» процесу лежить вище перегину (завеликі відносні витрати промивної води  $Q'$ ), процес слід оптимізувати, просто зменшивши величину  $Q'$ . При цьому не відбудеться суттєвого зниження ефективності ступеню промивання, тому що робоча точка переміститься вниз по прямолінійній ділянці графіку до початку перегину. З іншого боку, коли «робоча точка» промивання на даному ступеню знаходиться праворуч від ділянок перегину графіків ефективності, такий процес можна легко оптимізувати, скоротивши енерговитрати на перемішування, або час перебування (контакту) матеріалу у промивній ванні, тобто зменшивши масообмінну характеристику ступеню  $kt$ . На графіку це ілюструється переміщенням робочої точки процесу вліво, знову таки до ділянки перегину.

**Постановка задачі дослідження.** Враховуючи неможливість досягнення необхідної ефективності, чистоти матеріалу після одноступеневого промивання, на практиці найбільш розповсюдженими є каскадні репульпаційні процеси з поступеневою інтенсифікацією гідродинамічного режиму, регламентацією часу контакту, стікання та віджиму. Для оптимізації таких процесів по енерговитратам, водоспоживанню кожного промивного апарату і каскаду в цілому, мета цієї роботи включає дослідження впливу всього комплексу технологічних факторів на кінцевий ефект промивання.

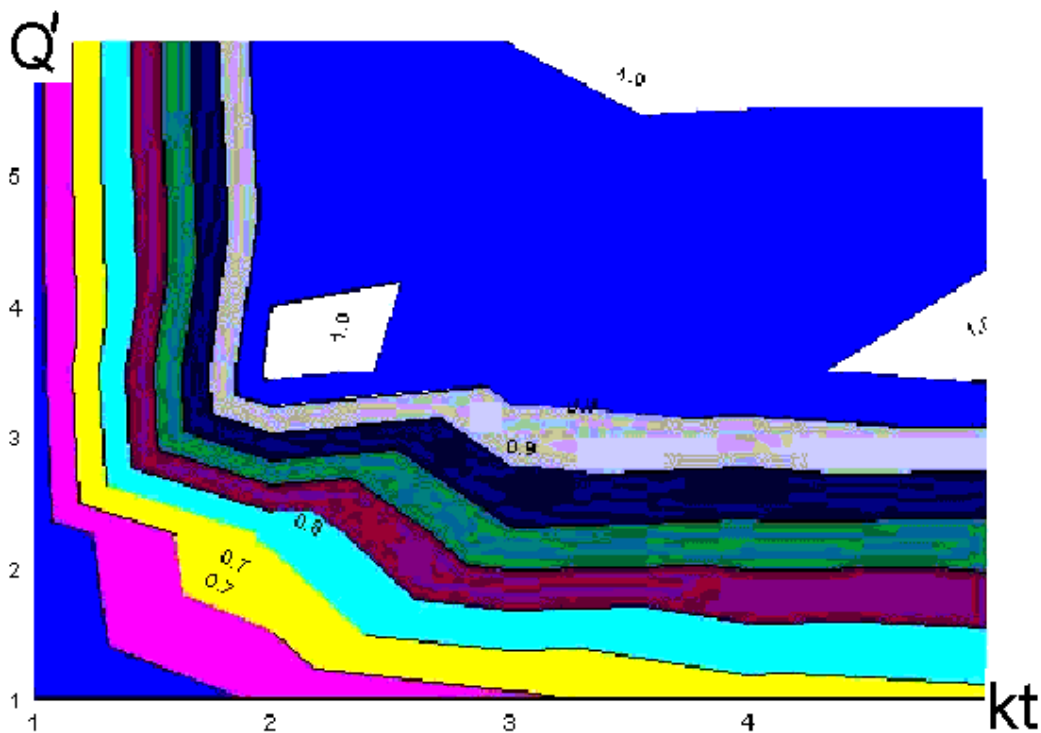


Рис. 1. Вплив витратної  $Q'$  та масообмінної характеристик  $kt$  на ефективність ступеню

**Теоретичне обґрунтування процедури оптимізації промивного каскаду.** Фрагмент розрахункової схеми каскаду протитічних промивних апаратів має вигляд, зображений на рис.2. Розглянемо показники забрудненості взаємодіючих потоків на останніх двох ступенях процесу з ефективністю  $E_i$  та  $E_{i-1}$ .

Система рівнянь, що зв'язують кінетику та матеріальний баланс вологості для  $i$ -го ступеня промивання мають вигляд:

$$E_{i-1} = \frac{x_{i-1} - x_i}{x_{i-1}} = 1 - \frac{x_i}{x_{i-1}} \quad (1)$$

Аналогічно, ефективність  $i$ -го ступеня запишеться у вигляді:

$$E_i = \frac{x_i - x_{i+1}}{x_i} = 1 - \frac{x_{i+1}}{x_i} \quad (2)$$

Для двох суміжних ступенів система рівнянь (1-2) матиме вигляд

$$x_{i+1} = x_{i-1}(1 - E_i)(1 - E_{i-1}) \quad (3)$$

Враховуючи теоретичні та експериментальні апроксимації [8, 9], забрудненість дисперсного матеріалу після двох ступенів промивання буде змінюватись згідно рівнянню (3), причому ефективність  $i$ -го ступеню буде експоненційно залежати від кожної з технологічної витратної  $Q_i$  та масообмінної  $kt_i$  характеристик промивання:

$$\frac{x_i}{x_{i-1}} = A_{i-1} \exp(-k_{i-1} t_{i-1}) \quad (4)$$

$$\frac{x_{i+1}}{x_i} = A_i \exp(-k_i t_i)$$

Зауважимо, що асимптоти  $A_i$  та  $A_{i-1}$  при постійному співвідношенні витрат промивної води та забруднених застійних зон визначаються виключно матеріальним балансом кожного ступеню і на рішення даної оптимізаційної задачі не впливають. Питання полягає у виборі такого співвідношення об'ємник коефіцієнтів масовіддачі та часу контакту матеріалу з промивним потоком, щоб досягти максимального зниження забрудненості матеріалу на парі суміжних ступенів. При цьому природними є обмеження загального часу контакту та сумарних енерговитрат для інтенсифікації промивання, наприклад, перемішування, барботажа, тощо:

$$\begin{aligned} \sum_1^i k_i &= const \\ \sum_1^i t_i &= const \end{aligned} \quad (5)$$

Перемножуючи почленно рівняння системи (4) можна впевнитись, що мінімальне відношення забрудненості матеріалу після двоступеневого фрагменту каскаду (пари суміжних ступенів промивання)  $x_{i-2} / x_i$  при обмеженнях (5) досягається у випадку, коли на більш ефективно працюючому ступені (з більшим коефіцієнтом масовіддачі) матеріал промивається більш тривалий час і, навпаки, енерговитрати на інтенсифікацію промивання повинні бути збільшені на ступенях з більшим часом перебування матеріалу.

Для оптимізації всього каскаду промивних апаратів слід притримуватись послідовного вибору пар каскаду з корегуванням технологічних характеристик кожного ступеню. Наприклад, пари вибираються таким чином  $x_{i+1} / x_{i-1}$ ;  $x_i / x_{i-2}$ ;  $x_{i-1} / x_{i-3}$ .

**Висновок.** Максимальне зниження забрудненості дисперсного матеріалу, що промивається в протитечійному каскадному режимі досягається за умови диференційованого розподілу масообмінних та витратних характеристик. Оптимізація вказаних характеристик досягається розрахунком кінетики промивання для попарної послідовності суміжних ступенів в залежності від коефіцієнтів масовіддачі та часу контакту взаємодіючих потоків на кожному ступеню каскаду.

## Література

1. Артюхова Н.О. Сушіння дисперсних матеріалів у багаступневих полицних апаратах з активним гідродинамічним режимом:... дис. кандидата техн. наук: 05.17.08 / Артюхова Надія Олександрівна. – Суми. 2015 – 187 с.
2. Shandyba A.V., Shpetny D.N. Rational water consumption under multistage washing. Збірник праць XVII Міжнародного симпозіуму «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики. (МДОЗМФ-2015). Харківський національний університет ім. Н.В. Каразіна, Сумський державний університет. Суми, 8-13 червня 2015 р. – С. 273-277.
3. Шандиба О.Б. Вплив розчинності гранульованих мінеральних добрив на динаміку міграції рухомих вомпонентів в ґрунтово-водних системах схилених земель /О.Б. Шандиба, Д.М. Шпетний, А.В. Толбатов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2015. – №4 –С.64–68.
4. Толбатов А.В. Побудова систем моніторингу, аналізу та оцінки прийняття рішень регіонального рівня для ситуаційних центрів АПК / О.Б. В'юненко, А.В. Толбатов, Агаджанова С.В., В.А. Толбатов, О.Б. Шандиба, С.В. Толбатов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2015. – №4 –С.194–201.
5. Shandyba O.V. Investigation of granulated phosphate fertilizers cooling process / N.O. Artukhova, D.M.Shpetny, O.V. Shandyba, G.A. Smolarov, A.V. Tolbatov, N.S.Borozenets // Вимірювальна та

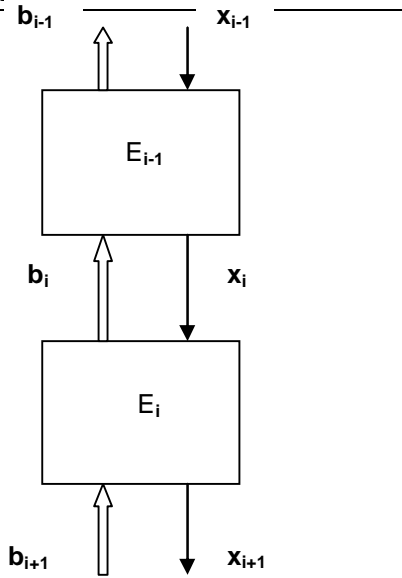


Рис.2. Фрагмент розрахункової схеми каскаду промивних апаратів

обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2016. – №3 –С.33–38.

6. Tolbatov A.V. Information technology for data exchange between production purpose integrated automated systems / P.M. Pavlenko, A.V. Tolbatov, V.V. Tretiak, S.V. Tolbatov, V.A. Tolbatov, H.A. Smolyarov, O.B. Viunetko // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2016. – №1 –С.86–89.

7. Tolbatov V.A. Optimization of the recycling water supply system / Tolbatov V.A., Shandyba A.B., Shpetny D.M. ... // Матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2016), м. Суми, 22-23 вересня 2016 р. – Суми : СумДУ, 2016. – С.110–111.

8. Shandyba A.B. Ecology forecast for migration of the chemical substances into ground and surface water.- Fresenius Environ. Bulletin, N 4, Basel, Switzerland, 1995.- pp. 80 – 85.

9. Shandyba A.B., Vakal S.V., Chivanov V.D. Pollution removing by washing of contaminated soils.- in Proc. of the GREEN-2 Int. Simp., Krakow, Poland, 1997.- pp. 313 – 316.

10. Tolbatov A. Data Representing and Processing in Expert Information System of Professional Activity Analysis / Oleh Zaritskiy, Petro Pavlenko, Andrii Tolbatov // TCSET 2016 – Lviv-Slavske, 2016. – P. 718–720.

11. Tolbatov A. Mathematical models for the distribution of functions between the operators of the computer-integrated flexible manufacturing systems / Evgeniy Lavrov, Nadiia Pasko, Anna Krivodub, Andrii Tolbatov // TCSET 2016 – Lviv-Slavske, 2016. – P. 72–75.

#### References

1. Artyukhova N.O. Sushinnya dyspersnykh materialiv u bahatostupeneykhykh polychnykh aparatakh z aktyvnykh hydrodynamichnym rezhymom:... dys. kandydata tekhn. nauk: 05.17.08 / Artyukhova Nadiya Oleksandrivna. – Sumy, 2015 – 187 s.

2. Shandyba A.B., Shpetny D.N. Rational water consumption under multistage washing. Zbirnyk prats' KhVII Mizhnarodnoho sympoziumu «Metody dyskretnykh osoblyvostey v zadachakh matematychnoyi fizyky. (MDOZMF-2015). Kharkivs'kyi natsional'nyi universytet im. N.V. Karazina, Sums'kyi derzhavnyi universytet. Sumy, 8-13 chervnya 2015 r. – S. 273-277.

3. Shandyba O.B. Vplyv rozchynnosti hranul'ovanykh mineral'nykh dobyv na dynamiku mihratsiyi rukhomykh vomponentiv v hruntovo-vodnykh systemakh skhylovykh zemel' /O.B. Shandyba, D.M. Shpetnyy, A.V. Tolbatov // Vymiryval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – Khmel'nyts'kyi, 2015. – №4 –S.64–68.

4. Tolbatov A.V. Pobudova system monitorynhu, analizu ta otsinky pryynyattya rishen' rehional'noho rivnya dlya sytuatsiynykh tsentriv APK / O.B. V'yunenko, A.V. Tolbatov, Ahadzhanova S.V., V.A. Tolbatov, O.B. Shandyba, S.V. Tolbatov // Vymiryval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – Khmel'nyts'kyi, 2015. – №4 –S.194–201.

5. Shandyba O.B. Investigation of granulated phosphate fertilizers cooling process / N.O. Artukhova, D.M. Shpetny, O.B. Shandyba, G.A. Smolarov, A.V. Tolbatov, N.S. Borozenets // Vymiryval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – Khmel'nyts'kyi, 2016. – №3 –S.33–38.

6. Tolbatov A.V. Information technology for data exchange between production purpose integrated automated systems / P.M. Pavlenko, A.V. Tolbatov, V.V. Tretiak, S.V. Tolbatov, V.A. Tolbatov, H.A. Smolyarov, O.B. Viunetko // Vymiryval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – Khmel'nyts'kyi, 2016. – №1 –S.86–89.

7. Tolbatov V.A. Optimization of the recycling water supply system / Tolbatov V.A., Shandyba A.B., Shpetny D.M. ... //Materialy XXIII mizhnarodnoyi konferentsiyi z avtomatychnoho upravlinnya (Avtomatyka-2016), m. Sumy, 22-23 veresnya 2016 r. – Sumy : SumDU, 2016. – S.110–111.

Рецензія/Peer review : 11.06.2017 р.

Надрукована/Printed :07.10.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією