

О.І. МАЛАКОВ, С.А. БУРЛАКА, Ю.О. МИХАЛЬОВА
Вінницький національний аграрний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ЗМІШУВАЧІВ

В статті систематизовано і узагальнено методи проектування змішувального обладнання та інтенсифікації процесів змішування, вирішені завдання, пов'язані з методологічними засадами пошуку шляхів підвищення інтенсивності та ефективності робочих процесів змішувальних машин. Встановлено, що вони вимагають уточнення і подальшого вдосконалення існуючих методик розрахунку змішувального обладнання з використанням перспективних фізико-технічних ефектів. Обґрунтовано вплив змішувальних силових факторів на зміну траєкторії руху виконавчих органів вібраційної технологічної системи, що дозволяє прогнозувати поведінку завантаження та мінімізувати кількість кінематичних ланок у системі. Вивчені напрями розвитку конструкцій енергозберігаючих та високопродуктивних вібраційних приводів машин для реалізації дроблення, різання, перемішування, очищення поверхневого покриву та розділення неоднорідних систем в процесах харчових і переробних виробництв. Досліджено динамічні моделі вібраційних приводів з комбінованим кінематичним вібробудженням, отримано аналітичні залежності для оцінки кінематичних, силових та енергетичних характеристик колівальних систем, що дозволило здійснити вибір та обґрунтування раціонального способу вібробудження для технологічних машин механічної дії на сировину. Проаналізовані математичні моделі, що найбільш часто використовуються при вивченні кінетики процесів змішування за допомогою функції розподілу часу перебування (РЧП) досліджуваного компонента в апараті по кривим відгуку на характер опору. Визначена адекватність розглянутих моделей змішування реальним фізичним процесам, що відбуваються в перемішувальних пристроях, шляхом нанесення перевірених даних на розрахункові криві при ступінчастому введенні індикатора. При розробці та аналізі математичних моделей були використані наближені дані про можливі величини деяких параметрів рівнянь моделі, проведена корекція моделі.

Ключові слова: змішування, динамічні моделі, математичне моделювання, вібраційні машини.

O.I. MALAKOV, S.A. BURLAKA, Y.O. MIKHALIOVA
Vinnitsia National Agrarian University

MATHEMATICAL MODELLING AND BASICS OF CONSTRUCTION OF VIBRATION MIXERS

The article systematizes and generalizes the methods of designing mixing equipment and the intensification of mixing processes, solved the problems associated with the methodological principles of finding ways to increase the intensity and efficiency of the working processes of mixing machines. It was established that they require clarification and further improvement of existing methods for calculating mixing equipment using promising physical and technical effects. The effect of mixing force factors on the change in the path of the executive bodies of the vibration technological system, which allows to predict the loading behaviour and minimize the number of kinematic links in the system, is substantiated. The directions of development of the designs of energy-saving and high-performance vibration drives of machines for the implementation of crushing, cutting, mixing, cleaning the surface cover and separation of heterogeneous systems in the processes of food and processing industries are studied. The dynamic models of vibration drives with combined kinematic vibration excitation are investigated. Analytical dependences are obtained for assessing the kinematic, power and energy characteristics of vibration systems, which made it possible to select and justify a rational method of vibration excitation for technological machines for mechanical impact on raw materials. Mathematical models are analysed, and they are most often used when studying the kinetics of mixing processes using the residence time distribution (RTD) function of the component under study in the response curves of the nature of the resistance. The certain adequacy of the considered mixing models for real physical processes occurring in mixing devices by applying verified data to the calculated curves with the stepwise introduction of the indicator. When developing and analysing mathematical models, approximate data on the possible values of some parameters of the model equations were used, and the model was corrected.

Key words: dynamic model, dynamic model, mathematical model, automatic machine.

Вступ

Узагальнення і аналіз методів проектування змішувального обладнання і інтенсифікації процесів змішування показують, що вирішені далеко не всі завдання, пов'язані з методологічними засадами пошуку шляхів підвищення інтенсивності та ефективності робочих процесів змішувальних машин. Зокрема, вимагають уточнення і подальшого вдосконалення існуючих методик розрахунку змішувального обладнання з використанням перспективних фізико-технічних ефектів, наприклад, вібрації, а також ряд приватних завдань з проектування першочергових важливих елементів конструкцій.

Як узагальнений метод пошуку нових технічних рішень в даний час використовують метод системного аналізу для вивчення складних технічних систем і процесів. Під системним аналізом мається на увазі вся методологія процесу вироблення і прийняття рішень у проблемних ситуаціях, коли операції аналізу і синтезу тісно перетинаються. В процедуру системного аналізу технічної системи входять етапи: формулювання мети, аналіз проблеми і структури технічної системи, аналіз закономірностей і тенденції історичного розвитку, складання моделей і розробка розгорнутого плану досліджень, вибір критеріїв порівняння тощо.

Мета і задачі роботи

Метою дослідження є зменшення енерговитрат та підвищення продуктивності операцій вібраційних змішувачів, перемішування, механічного розділення неоднорідних систем на основі математичного аналізу

досліджуваних процесів та обладнання, визначення перспективних напрямів підвищення їх ефективності, обґрунтування науково технічних основ конструювання вібраційних змішувачів.

Методи моделювання процесів змішування. Основні завдання, що стоять перед проектувальником: вибір конструктивної схеми змішувача; визначення його геометричних і кінематичних параметрів; розрахунок потужності, споживаної в процесі змішування; визначення часу перемішування (або продуктивності змішувача). Вибір конструктивної схеми змішувача пов'язаний з формулюванням вимог до режиму роботи (циклічний, безперервний). Геометричні і кінематичні параметри в основному визначаються необхідною продуктивністю по випуску готової продукції.

При вивченні кінетики процесу змішування гомогенних або гетерогенних середовищ, у визначенні споживаної потужності головну роль відіграють експериментальні дослідження, що дозволяють встановити найпростіші досліди, на основі яких можна формулювати закони, що керують досліджуваним явищем, і записати їх у вигляді деяких математичних співвідношень. Вони включають такі методи: 1 – заснований на аналізі структури потоків за допомогою функції розподілу часу перебування (РЧП) частинок суміші в корпусі змішувача; 2 – механіка суцільних середовищ з використанням детермінованих або стохастичних підходів; 3 – ентропійно-інформаційний; 4 – емпіричний (феноменологічний); 5 – фізичного моделювання; 6 – статистичний; 7 – оптимального планування [1, 2].

Нижче представлені деякі математичні моделі, найбільш часто використовувані в хімічній технології під час вивчення кінетики процесів змішування за допомогою функції розподілу часу перебування (РЧП) досліджуваного компонента в апараті по кривим відгуку на характер опір.

Модель ідеального витіснення. Відповідно до цієї моделі приймається:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -v \frac{\partial c}{\partial \tau},$$

де C – концентрація досліджуваного компонента, v – швидкість потоку матеріалу, τ – час [3–5].

Характер відгуку на ступінчатий $F(\tau)$ і імпульсний $C(\tau)$ опір показані на рис. 1.

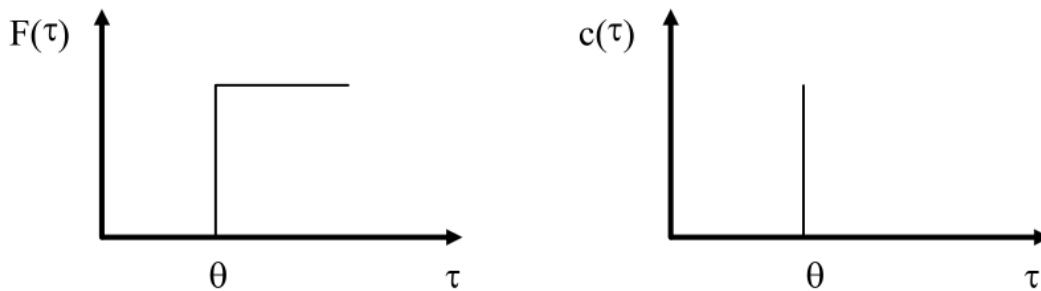


Рис. 1. Відгук на типовий опір

Модель ідеального змішування. Відповідно до цієї моделі приймається рівномірний розподіл досліджуваного компонента в усьому обсязі змішаного матеріалу:

$$\frac{dc_{\text{вих}}}{d\tau} = \frac{V_c}{V} (C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}})$$

де $C_{\text{вх}}, C_{\text{вих}}$ – відповідно концентрація досліджуваного компонента на вході і виході зі змішувача;

V_c, V , – відповідно об'ємна швидкість потоку і обсяг змішувача.

Характер відгуку на ступінчатий $F(\tau)$ і імпульсний $C(\tau)$ опір показані на рис. 2.

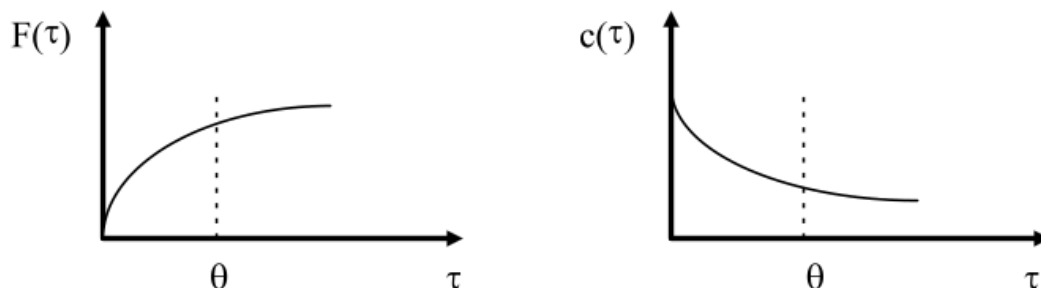


Рис. 2. Відгук на типовий опір

Очевидно, що моделі ідеального змішування відповідає аперіодична ланка і функція відгуку має вигляд:

$$C(\tau) dt = \frac{V_c}{V} e^{-V_c \tau / V} d\tau = \frac{e^{-\tau/\bar{\tau}}}{\bar{\tau}} d\tau,$$

де $\bar{\tau} = \frac{V_c}{V}$ – середній час перебування досліджуваного компонента в змішувачі [6, 7].

Дифузійна модель змішання. Розрізняють два типи моделей: однопараметричні і двопараметричні. Їх основою є модель ідеального витіснення поєднана з процесом перемішування, який підпорядковується формальним законом дифузії. При використанні даних моделей приймаються такі припущення: зміна концентрації досліджуваного компонента є безперервною функцією координати. Концентрація його в перерізі постійна, об'ємна швидкість потоку і коефіцієнти перемішування не змінюються по перетину змішувача.

При таких припущеннях моделі описуються рівняннями:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{и} \quad \frac{\partial c}{\partial \tau} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{D_R}{R} * \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial c}{\partial R} \right),$$

де D_L, D_R – коефіцієнти подовжнього і поперечного змішування; R – певний лінійний розмір.

В ході дослідного визначення коефіцієнтів перемішування їх представляють у вигляді безрозмірних комплексів – критеріїв Пекле:

$$Pe_L = \frac{D_L}{vL}; Pe_R = \frac{D_R}{vL}.$$

Якщо $Pe \rightarrow 0$, дифузійна модель переходить в модель ідеального витіснення; при $Pe \rightarrow \infty$ – в модель ідеального змішування.

У змішувачах безперервної дії на підставі дифузійних моделей при різній інтенсивності змішування С-криві апроксимуються нормальним або гаусовським розподілом. Зв'язок між дисперсією σ^2 і Pe_L задається рівнянням $\sigma^2 = 2 \frac{D_L}{vL}$. Характер відгуку на ступінчастий $F(\tau)$ і імпульсний $C(\tau)$ опір представлено на рис. 3.

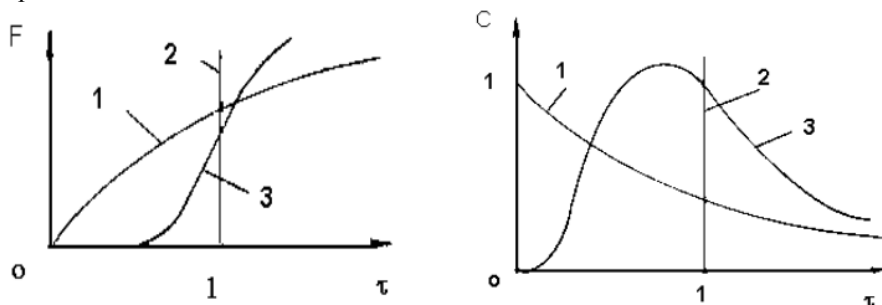


Рис. 3. Відгук на типовий опір:

а) дифузійні моделі: 1 – ідеального змішування; 2 – ідеального витіснення; 3 – проміжна; б) осередкова модель: 1) число осередків $m = 1$; 2) $m = \infty$; 3) m приймає проміжні значення

Осередкова модель. Основою моделі є уявлення про ідеальне перемішування в межах осередків (мішалок) з'єднаних послідовно або паралельно і відсутності перемішування між ними. Параметром, що характеризує модель, служить число осередків m . Математичний опис осередкової моделі складається з m лінійних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\frac{1}{m} * \frac{dc_i}{d\tau} = \frac{1}{\tau_n} (c_{i-1} - c_i),$$

де $i = 1, 2, 3, \dots$

Осередковою моделлю оцінюють функцію розподілу в послідовно з'єднаних змішувачах, які здійснюють інтенсивне перемішування, абсорбційних і екстракційних колонах, апаратах з псевдозріждженими шарами. Різновидом осередкової моделі є модель зі зворотним потоком, в якій враховується наявність зворотного потоку між осередками. Зв'язок між розподілом по С-кривій і числом осередків визначається рівнянням:

$$C = \frac{c}{c_0} = \frac{m\theta^{m-1}}{(m-1)!} e^{-m\theta}$$

При $m > 10$ достатню для практичних розрахунків точність дає вираз:

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} = 2 \frac{D_L}{vR}.$$

Осередкова модель при $m = 1$ переходить в модель ідеального змішування, при $m \rightarrow \infty$ – в модель

ідеального витіснення. Характер відгуку на ступеневий $F(\tau)$ і імпульсний $C(\tau)$ опір представлені на рис. 3 [8, 9].

Висновок

Адекватність розглянутих моделей змішання реальним фізичним процесам, що відбуваються в перемішувачах, найчастіше встановлюється шляхом нанесення перевірених даних на розрахункові криві при ступінчастому введенні індикатора. Оскільки при розробці математичних моделей використовуються наближені дані про можливі величини деяких параметрів рівнянь моделі, виникає необхідність корекції моделі. Корекція моделі проводиться на реальних фізичних лабораторних і напівпромислових моделях. Перехід до інших масштабів здійснюється за допомогою методів фізичного моделювання.

Не всі реальні процеси вдається описати за допомогою розглянутих вище моделей. У цих випадках використовують комбіновані моделі, що складаються з послідовно і (або) паралельно з'єднаних перерахованих вище моделей. Комбінованою моделлю може бути описаний практично будь-який складний процес, проте його моделювання значно ускладнюється через громіздкість рівнянь, що утворюються, і складності їх рішень.

Література

1. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання / В.О. Повідайло. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004. – 248 с.
2. Бабичев А.П. Основы вибционной технологии / А.П. Бабичев, И.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 1999. – 620 с.
3. Цуркан О.В. Комбінований вібраційний змішувач / О.В. Цуркан, І.М. Кесарчук // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 1(53). – С. 114-115.
4. Sarang O. Effects of powder cohesion and segregation on pharmaceutical mixing and granulation: dissertation of doctor of philosophy : 05.2003 / O. Sarang. – USA: New Jersey, 2016. – P. 1–8.
5. Баранецька О.Р. Вібраційне змішування сумішей сипучих матеріалів / О.Р. Баранецька // машинознавство. – 2000. – № 3 (33). – С. 60–63.
6. Берник М.П. Віброімпульсний привод нового вібраційного змішувача / М.П. Берник, О.В. Цуркан, Л.Д. Величко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2001. – № 2(18). – С. 3–7.
7. Пат. На корисну модель 115132 Україна (UA), МПК B01F 11/00. Вібровідцентровий змішувач / В.П. Янович, І.П. Паламарчук, Ю.О. Михальова ; заявник і патентовласник Янович В.П. – Заявл. 25.07.2016 ; опубл. 10.04.2017, Бюл. No 7. – 5 с.
8. Григоренко Ю.В. Математичні моделі та узагальнення математичного опису процесів первинної переробки сирих вуглеводнів [Електронний ресурс] / Ю.В. Григоренко // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2014. – Режим доступу : http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Itmm_2014_4_2_13.pdf.
9. Погосов А.Ю. Моделирование физических процессов и технологическая информатизация в нефтяной промышленности и энергетике : монография / А.Ю. Погосов, С.А. Положаенко, Ю.В. Григоренко. – Одесса : Наука и техника, 2013. – 656 с.

References

1. Povidaylo V.O. Vibration processes and equipment / V.O. Povidaylo. – Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2004. – 248 p.
2. Babichev A.P. Fundamentals of Vibration Technology / A.P. Babichev, I.P. Babichev. – Rostov-on-Don : Publishing center of DSTU, 1999. – 620 p.
3. Tsurkan O.V. Combined vibrating mixer / O.V. Zurkan, I.M. Kesarchuk // Vibrations in Engineering and Technology. – 2009. – No 1 (53). – P. 114–115.
4. Sarang O. Effects of powder cohesion and segregation on pharmaceutical mixing and granulation: dissertation of doctor of philosophy : 05.2003 / O. Sarang. – USA: New Jersey, 2016. – P. 1–8.
5. Baranetska O.R. Vibrational mixing of mixtures of bulk materials / O.R. Baranetska // Mechanical Engineering. – 2000. – No 3 (33). – P. 60–63.
6. Bernik M.P. Vibration impulse drive of a new vibration mixer / M.P. Bernik, O.V. Zurkan, L.D. Velichko // Vibrations in Engineering and Technology. – 2001. – No 2 (18). – P. 3–7.
7. Pat. For utility model 115132 Ukraine (UA), IPC B01F 11/00. Vibration centrifugal mixer / V.P. Yanovich, I.P. Palamarchuk, Y.O. Mikhaliova ; the applicant and the patent owner Janovich V.P. – Statement. 25.07.2016 ; publ. 10/04/2017, Bul. No. 7. – 5 p.
8. Grigorenko Y.V. MATHEMATICAL MODELS AND GENERALIZATION OF THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESSES OF PRIMARY PROCESSING OF CRUDE CARBON [Electronic resource] / Y.V. Grigorenko // MNATMET. – 2014. – Resource access mode: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_201.pdf
9. Pogosov A.Y. Modeling of physical processes and technological informatization in the oil industry and energy: a monograph / A.Y. Pogosov, S.A. Polozhaenko, Y.V. Grigorenko. – Odessa : Science and Technology, 2013. – 656 p.

Рецензія/Peer review : 21.06.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.Ф. Малаков