

УСРЕДНЕНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ: СПОСОБЫ, КОНСТРУКЦИИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В. Я. Борщев, Т. А. Сухорукова, А. А. Ерохина, Е. В. Троегубова

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; borschov@yandex.ru*

Ключевые слова: математическое описание; процесс усреднения; способы усреднения; усреднители.

Аннотация: Рассмотрены наиболее распространенные, а также современные способы усреднения сыпучих материалов. Приведен обзор конструкций аппаратов для усреднения сыпучих сред. Обозначены основные проблемы процесса усреднения сыпучих материалов в химической промышленности. Намечены пути совершенствования усреднительного оборудования. Разработана конструкция усреднителя, состоящая из каскада пересыпных воронок и установленных между ними разрыхлителей. В усреднителе интенсифицируется взаимное проникновение частиц сыпучего материала и обеспечивается однородное объемное распределение частиц смешиваемых компонентов. Рассмотрены способы математического описания процесса смешивания сыпучих материалов.

Введение

Процесс усреднения широко применяется в химической, пищевой и фармацевтической промышленности, сельском хозяйстве, а также в строительном производстве. Традиционные конструкции смесителей периодического действия (бараннные, центробежные, ленточные и т. п.), имеющие рабочий объем более 5 м³, характеризуются низкими технико-экономическими показателями, а также сложностью эксплуатации. Поэтому их применение в качестве усреднителей сыпучих материалов не позволяет эффективно решить обозначенную проблему.

В отечественной и зарубежной практике приготовление больших объемов смеси сыпучих компонентов реализуется в специальных конструкциях смесителей, состоящих из бункеров большого объема и транспортирующих устройств.

Способы усреднения сыпучих материалов

Значительный вклад в теоретические и экспериментальные исследования процесса смешивания сыпучих материалов в большом объеме внесли ученые Ю. И. Макаров, А. И. Зайцев, В. Н. Иванец и др. [1 – 3]. Однако до настоящего времени весьма актуальными являются задачи повышения эффективности и интенсивности процессов усреднения сыпучих материалов в целях получения смеси высокого и стабильного качества конечного продукта. Цель настоящей работы состоит в анализе известных способов и конструкций усреднителей и возможности их применения для эффективного усреднения партий сыпучих материалов в химической и смежных отраслях промышленности.

Смешивание сыпучих материалов в химической и смежных отраслях промышленности реализуется, как правило, следующими способами:

- гравитационным – в стационарных бункерных установках;

- гравитационно-инерционным – во вращающихся аппаратах барабанного типа (барабанные смесители);
- вибрационным – с использованием различных вибрирующих устройств (лотков, труб и т.д.);
- путем принудительного воздействия на смесь различных движущихся механизмов (лопастей, шнеков, винтов и др.);
- пневматическим – путем псевдооживления материала под действием газа (воздуха).

Все способы смешивания, за исключением гравитационного, характеризуются высокими энергетическими затратами, а также значительными измельчением частиц материала и пылеобразованием.

Усреднительное оборудование

В химической промышленности наиболее распространены так называемые механические усреднители, в которых процесс усреднения реализуется вследствие механического воздействия различных по конструкции и форме рабочих органов на частицы сыпучего материала.

Известные конструкции непрерывно действующих усреднителей по аналогии с непрерывно действующими смесителями в зависимости от характера движения в них сыпучего материала можно условно разделить на три группы:

- 1) имеющие практически поршневое перемещение материала вдоль оси, то есть продольное перемешивание частиц отсутствует;
- 2) усреднители, в которых частицы сыпучего материала в процессе продольного перемещения дополнительно продольно перемешиваются;
- 3) характеризующиеся хаотичным перемещением частиц по всему внутреннему объему устройства.

К усреднителям с практически поршневым движением материала вдоль оси корпуса с незначительным продольным перемешиванием частиц в конической части бункера относится пересыпной усреднитель [1], необходимое качество смеси в котором можно получить только в результате многократного прохождения загруженного в бункер материала через его коническую часть.

В связи с тем, что интенсивность процесса усреднения в пересыпном усреднителе низкая, достичь приемлемое качество смеси возможно только при обеспечении кратности циркуляции более тридцати. В целях интенсификации процесса смешивания в бункерных усреднителях используют дополнительный перемешивающий элемент различной конструкции. Такие конструкции усреднителей называют циркуляционными. В них под действием вращающегося рабочего органа кроме циркуляции по замкнутому контуру обеспечивается также дополнительное продольное движение материала.

Фирмой Гебрюдер Лёдиге Maschinenbau (Германия) разработана конструкция циркуляционного усреднителя типа «Вертамикс» (рис. 1), позволяющая по сравнению с пересыпным существенно интенсифицировать процесс смешивания.

Голландская фирма Наутамикс выпускает циркуляционные усреднители «Наута», в которых транспортирующий шнек, смонтированный внутри конического бункера, совершает планетарное вращение около внутренней его поверхности.

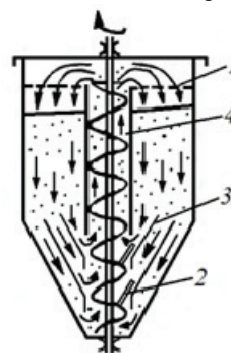


Рис. 1. Циркуляционный усреднитель:

- 1 – распределительная решетка;
- 2 – радиальные лопасти;
- 3 – неподвижные конусы;
- 4 – центральная труба

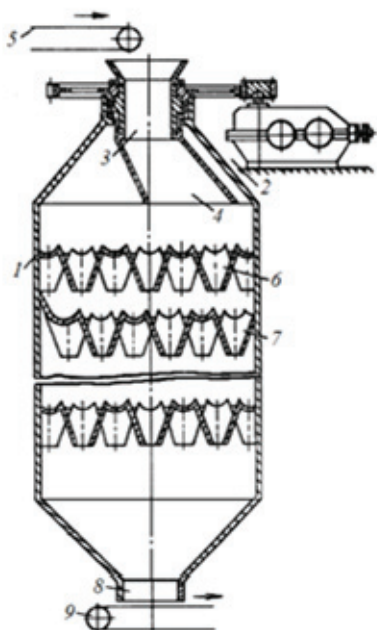


Рис. 2. Устройство для усреднения сыпучих материалов

устройство для усреднения сыпучих материалов, представленное на рис. 2 [4].

Устройство работает следующим образом. Сыпучий материал подается в цилиндрический корпус 1 через конусную часть 2, в которой вращается втулка 3 с распределительным патрубком 4. Вследствие этого сыпучий материал с конвейера 5 равномерно распределяется по сечению корпуса 1. При этом он последовательно просыпается через разделительные решетки 6 и 7, установленные попеременно по всей высоте корпуса 1. Благодаря многократному разделению и перемешиванию потока на разделительных решетках происходит усреднение материала. В нижней части корпуса 1 усредненный материал через патрубок 8 поступает на приемный конвейер 9.

В данном устройстве достаточно сложно обеспечить равномерное распределение сыпучего материала по поперечному сечению корпуса. Кроме того, практически отсутствуют возможности управления процессом усреднения.

Математическое описание процесса смешивания сыпучих материалов

Целью математического моделирования процесса смешивания сыпучих материалов является определение функциональной связи между критерием качества смеси и конструктивными и режимными параметрами смесителя и физико-механическими свойствами компонентов смеси (средний диаметр частиц компонентов, насыпная плотность, угол естественного откоса сыпучих компонентов и пр.) [5 – 7].

Вследствие того, что процесс смешивания сыпучих материалов имеет случайную природу, то для его описания широко применяется стохастический подход. В то же время в настоящее время достаточно успешно используются и детерминированные подходы к математическому описанию процесса смешивания.

Основным недостатком планетарно-шнековых смесителей является возможность образования застойных зон в пристеночных областях корпуса аппарата, а также низкая эффективность горизонтального перемещения частиц материала.

В производстве гранулированных полимерных материалов (в частности, полипропилена) используют усреднители с псевдооживленным слоем материала, который организуется путем продувки через него инертного газа. Недостатками усреднителей с псевдооживленным слоем материала являются низкая эффективность при приготовлении больших объемов сыпучих материалов, возможность истирания частиц и, как следствие, значительный пылеунос.

Простотой конструкции и универсальностью характеризуются барабанные смесители непрерывного действия, недостатком которых является наличие мертвых зон. Для усреднения партий материалов, склонных к налипанию на рабочих поверхностях, целесообразно использовать

В качестве детерминированных способов математического описания используют регрессионные модели, типовые модели структуры потока и кибернетический подход. Регрессионные модели [1] характеризуются эмпирическими соотношениями, описывающими взаимосвязь критерия качества смеси и параметров смесителя. Достоинствами данного способа математического моделирования являются надежность, возможность установления связей в исследуемых пределах. Однако для такого подхода характерна высокая трудоемкость.

Типовыми моделями структуры потока [1] являются модели идеального вытеснения, идеального смешения, диффузионная, ячеечная и комбинированная.

В основе ячеечной модели заложено представление о том, что в результате движения в потоке материала через ряд последовательно соединенных ячеек идеального перемешивания, перераспределения частиц между ячейками не происходит [8].

Комбинированные модели целесообразно применять для смесителей, структура потока в которых характеризуется наличием застойных зон и зон циркуляции. Использование таких моделей позволяет описать практически любой сложный процесс. Однако получаемое при этом подходе математическое описание отличается достаточной сложностью.

Для математического описания процесса смешивания сыпучих материалов часто применяют диффузионные модели. При этом подходе процесс смешивания описывают дифференциальными уравнениями Фоккера–Планка [1]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(c(x, r)u(x)) + \frac{\partial^2}{\partial x^2}(D_L(x)c(x, r)) + \frac{D_R}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c(x, r)}{\partial r} \right),$$

где $u(x)$ – средняя скорость конвективного перемещения материала в смесителе; r, x – координаты; D_R, D_L – коэффициенты поперечной и продольной диффузии соответственно.

Для описания механизма перемешивания псевдоожижением, сходным с молекулярной диффузией, применяют уравнение Фика

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2},$$

где c – концентрация частиц; D – коэффициент диффузии; x – расстояние в направлении рассеяния.

При недостатке информации о процессе используется энтропийно-информационный подход [1], при котором относительную эффективность смешения определяют по зависимости

$$\Phi = \frac{H(E)_{\max} - H_v}{H(E)_{\max}},$$

где $H(E)_{\max}$ – энтропия смеси, в каждой пробе которой концентрации всех компонентов находятся в одном и том же отношении; H_v – энтропии реальной смеси сыпучих.

В исследовательской практике для описания процессов смешивания часто применяют математические модели, основанные на теории цепей Маркова [1, 9, 10].

Пример использования ячеечной марковской модели для описания процесса смешивания сыпучего материала на скате и в поперечном сечении безнасадочного вращающегося барабана приведен в работе [11]. Засыпка циркулирующего в барабане материала делится на подслои, имеющие определенное число элемен-

тарных объемов в каждом подслое. При этом делается предположение, что в течение одного цикла вращения частицы вокруг центра циркуляции она может переместиться только в близлежащий элементарный объем одного из соседних подслоев. Распределение основного компонента в засыпке оценивается в виде вероятности нахождения основного компонента в элементарном объеме после каждого возможного перехода с использованием вектора состояния. Величина вектора состояния $E(m)$ после некоторого i -го перехода определяется по соотношению:

$$E(1) = E(0) \cdot P_1;$$

$$E(2) = E(1) \cdot P_2;$$

$$E(m) = E(m-1) \cdot P_m,$$

где P_m – матрица переходных вероятностей, соответствующих m_i переходу; $E(0)$ – вектор начального состояния системы.

В работе [12] сформулирован кинетический закон смешивания в связи с изменением индекса смешения M в результате протекания процесса. Индекс смешивания предложено определять как относительное изменение величины стандартного отклонения σ распределения целевого компонента в смеси

$$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0},$$

где σ_0 – стандарт некоторого начального распределения целевого компонента.

Однако кинетические параметры предложенной модели не отражают влияние физико-механических свойств частиц среды на скорость процесса, что практически лишает предложенную модель необходимых прогностических свойств.

Заключение

Проведенный анализ показал, что современные конструкции промышленных усреднителей в большинстве случаев морально устарели. Их существенным недостатком является низкая эффективность процесса усреднения и низкая эксплуатационная надежность. Поэтому для интенсификации процесса усреднения перспективными являются пути и подходы, позволяющие увеличивать турбулизацию и циркуляцию потоков смешиваемых партий материала, а также снижать металло- и энергоемкость усреднительного оборудования.

Авторами настоящей работы разработана конструкция усреднителя партий сыпучего материала, в которой реализуется активный режим движения компонентов по высоте корпуса аппарата [13]. Использование в устройстве каскада разрыхлителей потока партий материала и организация с их помощью множества параллельных разрыхленных потоков перемешивания в зазоре между пересыпными воронками и корпусом усреднителя позволяет существенно повысить эффективность процесса усреднения свойств материала. Интенсификацию перемешивания материала параллельных потоков обеспечивают также наклонные кронштейны, установленные каскадом с противоположным углом наклона в зазорах между пересыпными воронками и корпусом усреднителя. В результате интенсифицируется взаимное проникновение материала отдельных партий и достигается однородное объемное распределение их частиц на выходе из усреднителя.

В настоящее время пока не предложено обобщенное математическое описание процесса смешивания сыпучих материалов.

Список литературы

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. Иванец, В. Н. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, Г. Е. Иванец // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 3 (26). – С. 3 – 12.
3. Зайцев, А. И. Теория и практика переработки сыпучих материалов / А. И. Зайцев, Д. О. Бытев, В. Н. Сидоров // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. – 1988. – Т. 33, № 4. – С. 390.
4. А.с. СССР 1089262 (E21C41/00) / Устройство для усреднения сыпучих материалов / Резник Л. А., Рогач М. С., Павлов В. П. – 3512191/22-03; заявл. 19.11.1982; опубл. 30.04.1984, Бюл. № 16.
5. Бытев, Д. О. Основы теории и методы расчета оборудования для переработки гетерогенных систем в дисперсно-пленочном состоянии : дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.09. – Ярославль, 1995. – 545 с.
6. Таршис, М. Ю. Теория и принципы моделирования процесса смешивания сыпучих материалов и создания устройств с гибкими элементами для его реализации : монография / М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. И. Зайцев. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2011. – 100 с.
7. Капранова, А. Б. Учет гранулометрического состава сред при описании их смешивания в аппарате с подвижной лентой / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, А. И. Зайцев // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 754 – 757.
8. Мошинский, А. И. Ячеечные модели при сложных структурах потоков в аппаратах / А. И. Мошинский // Теор. основы хим. технологии. – 1992. – Т. 26, № 3. – С. 364 – 373.
9. Дурнев, А. С. Применение теории цепей Маркова к моделированию процесса смешивания в гладком вращающемся барабане / А. С. Дурнев, В. Ф. Першин // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 783 – 792.
10. Об оптимальных параметрах перемешивающей лопасти лопастного смесителя сыпучих материалов / Е. А. Баранцева [и др.] // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2008. – Т. 51, вып. 7. – С. 108 – 110.
11. Pershin, V. F. Simulation of the Processes of Segregation and Granulation of Particulate Solids in a Rotary Cylinder / V. F. Pershin // Int. Congress of Chemical Engineering, Chemical Equipment, Design and Automation. CHISA-90. – Praha, 1990. – P. 38.
12. Rose, H. E. A Suggested Equation Relating to the Mixing of Powders and Its Application to the Study of Performance of Certain Types of Machines / H. E. Rose // Trans. Instn. Chem. Engrs. – 1959. – № 37(2). – P. 47 – 56.
13. Пат. 2624477 РФ, МПК B01F7/18, B01F03/00. Усреднитель партий сыпучего материала / Долгунин В. Н., Борщев В. Я., Сухорукова Т. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2016116112; заявл. 25.04.2016; опубл. 04.07.2017. Бюл. № 19. – 10 с.

Mixing of Bulk Materials: Methods, Design, Mathematical Description

V. Ya. Borshchev, T. A. Sukhorukova, A. A. Erokhina, E. V. Troegubova

*Department of Technological processes, Devices and Technospheric Safety, TSTU,
Tambov, Russia, borschov@yandex.ru*

Keywords: mathematical description; mixing process; mixing methods; mixers.

Abstract: The paper considers frequently used ways of mixing bulk materials. The designs of devices for mixing granular media are reviewed. The main problems of mixing bulk materials in the chemical industry are indicated. The ways of improving the mixing equipment are outlined. The design of the mixer, consisting of a cascade of overflow funnels and mixing tools is proposed. In the mixer, mutual penetration of bulk material particles and their homogeneous distribution are intensified. The methods of mathematical description of the process of mixing of bulk materials are considered.

References

1. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchih materialov* [Apparatus for mixing loose materials], Moscow: Mashinostroenie, 1973, 216 p. (In Russ.)
2. Ivanec V.N., Bakin I.A., Ivanec G.E. *Intensifikaciya processov gomogenizacii i dispergirovaniya pri poluchenii suhikh, uvlazhnennykh i zhidkikh kombinirovannykh produktov* [Intensification of homogenization and dispersion processes in the production of dry, moistened and liquid combined products], *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technology and technology of food production], 2012, no. 3 (26), pp. 3-12. (In Russ.)
3. Zajcev A.I., Bytev D.O., Sidorov V.N. *Teoriya i praktika pererabotki sypuchih materialov* [Theory and Practice of Bulk Materials Processing], *Zhurnal Vsesoyuznogo himicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva* [Journal of the All-Union Chemical Society. D. I. Mendeleev], 1988, vol. 33, no. 4, p. 390. (In Russ.)
4. Reznik L.A., Rogach M.S., Pavlov V.P. *Ustrojstvo dlya usredneniya sypuchih materialov* [Device for averaging bulk materials], Russian Federation, 1984, A.s. SSSR 1089262 (E21C41/00) (In Russ.)
5. Bytev D.O. *PhD Dissertation (Technical)*, Yaroslavl', 1995. 545 p. (In Russ.)
6. Tarshis M.Yu., Korolev L.V., Zajcev A.I. *Teoriya i principy modelirovaniya processa smeshivaniya sypuchih materialov i sozdaniya ustrojstv s gibkimi elementami dlya ego realizacii* [Theory and principles of modeling the process of mixing loose materials and creating devices with flexible elements for its implementation], Yaroslavl': Izd-vo YaGTU, 2011, 100 p. (In Russ.)
7. Kapranova A.B., Bakin M.N., Zajcev A.I. *Uchet granulometricheskogo sostava sred pri opisanih ih smeshivaniya v apparate s podvizhnoj lentoy* [Accounting for the granulometric composition of media when describing their mixing in a device with a moving belt], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 754-757. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Moshinskij A.I. *Yacheechnye modeli pri slozhnykh strukturah potokov v apparatah* [Cell models with complex flow structures in apparatuses], *Teor. osnovy him. tekhnologii* [Theor. basis of chem. technologies], 1992, vol. 26, no. 3, pp. 364-373. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Durnev A.S., Pershin V.F. *Primenenie teorii cepej Markova k modelirovaniyu processa smeshivaniya v gladkom vrashchayushchemsya barabane* [Application of the theory of Markov chains to the modeling of the mixing process in a smooth rotating drum], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 783-792. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Berthiaux H., Gatamel C., Baranceva E.A., Mizonov V.E., Hohlova Yu.V. *Ob optimal'nykh parametrokh peremeshivayushchej lopasti lopastnogo sme-sitelya sypuchih materialov* [On the optimal parameters of the mixing blade of a blade mixer for bulk materials], *Izv. vuzov. Himiya i him. tekhnologiya* [Izvestiya universities. Chemistry and Chemistry technology], 2008, vol. 51, Is. 7, pp. 108-110. (In Russ.)
11. Pershin V.F. *Int. Congress of Chemical Engineering, Chemical Equipment, Design and Automation. CHISA-90, Praha, 1990, p. 38.*

12. Rose H.E. A Suggested Equation Relating to the Mixing of Powders and Its Application to the Study of Performance of Certain Types of Machines, *Trans. Instn. Chem. Engrs*, 1959, no. 37(2), pp. 47-56.

13. Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya., Suhorukova T.A. *Usrednitel' partij sypuchego materiala* [Bulk material batcher], Russian Federation, 2017, Pat. 2624477/ (In Russ.)

Mittelung von Schüttgütern: Wege, Konstruktionen, mathematische Beschreibung

Zusammenfassung: Es sind die am weitesten verbreiteten sowie modernen Mittelungsmethoden von Schüttgütern betrachtet. Ein Überblick über die Konstruktionen der Vorrichtungen für die Mittelung von Schüttgütern ist gegeben. Es sind die Hauptprobleme des Verfahrens zur Mittelung von Schüttgütern in der chemischen Industrie aufgezeigt. Es sind die Wege der Verbesserung der Mittelungsausrüstung bestimmt. Es ist die Konstruktion des Mittelwertbildners entwickelt, die aus einer Kaskade von Schüttnanlagetrichern und zwischen Ihnen installierten Treibmitteln der Sprengmittel besteht. In dem Mittelwertbildner wird das gegenseitige Eindringen von Schüttgutteilchen intensiviert und eine homogene volumetrische Verteilung der Teilchen der zu mischenden Komponenten gewährleistet. Es sind die Methoden der mathematischen Beschreibung des Mischprozesses von Schüttgütern untersucht.

Homogénéisation des matériaux en vrac: méthodes, conception, description mathématique

Résumé: Sont considérés les plus répandus ainsi que modernes moyens de l'homogénéisation des matériaux en vrac. Est cité l'aperçu des structures des constructions des appareils pour l'homogénéisation des matériaux en vrac. Sont marqués de principaux problèmes du processus de l'homogénéisation des matériaux en vrac dans l'industrie chimique. Sont cités les moyens du perfectionnement de l'équipement de l'homogénéisation. Est conçue la conception du moyennneur composé de la cascade des pots et des batteuses installées entre eux. Dans le moyennneur est identifiée la pénétration mutuelle des particules de la matière en vrac et assurée une distribution volumique homogène des particules des composants de mélange. Sont examinées les méthodes de la description mathématique du processus du mélange des matériaux en vrac.

Авторы: *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Сухорукова Татьяна Александровна* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Ерохина Анастасия Александровна* – магистрант; *Троегубова Елена Владимировна* – магистрант, ФГТОО ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГТОО ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.